

**FRESADO DE CAVIDADES DE FONDO PLANO EN ALUMINIO 6061
MEDIANTE ESTRATEGIA HSM (HIGH SPEED MACHINING)**

DANIEL FELIPE GRAJALES MARTÍNEZ

Código: 1.093.226.412

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2019

**FRESADO DE CAVIDADES DE FONDO PLANO EN ALUMINIO 6061
MEDIANTE ESTRATEGIA HSM (HIGH SPEED MACHINING)**

DANIEL FELIPE GRAJALES MARTÍNEZ

Código: 1.093.226.412

Trabajo de grado para optar al título de:

INGENIERO MECÁNICO

ING. RAFAEL ALBERTO LÓPEZ GUARNIZO

Director

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2019

Pereira 19 de febrero de 2019

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

Esta parte es para hacer un homenaje a aquellas personas que han contribuido en mi formación profesional y humana, a todos aquellos quienes aprecio y admiro, de quienes he adquirido los conocimientos a lo largo de mi vida.

A mi madre y a mi padre, Luz Nancy Martínez Henao y Luis Alfredo Grajales León, quienes me apoyaron en todo momento y me acompañaron siempre.

A mi familia, por su amor incondicional y su apoyo durante mi formación tanto como profesión y como persona.

A todos aquellos que me brindaron apoyo cuando lo necesité.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no habría sido posible sin la influencia de algunas personas con las que estoy profundamente agradecido, de manera especial agradezco:

A mi madre, Luz Nancy Martínez Henao. Quien ha sido la persona que fundo mis bases para afrontar las pruebas difíciles que se me presentaron en la vida, que con su amor, sacrificios, comprensión y dedicación día a día aportó para que esto fuera posible.

Al ingeniero Rafael Alberto López Guarnizo, cuyo acompañamiento y supervisión del proyecto, hizo posible que mi trabajo se desarrollara de manera satisfactoria, por su gran ayuda, su excelente disposición, su calidad humana y profesional, sus consejos y recomendaciones.

A todos los docentes que me han compartido sus conocimientos a lo largo de mi vida, por ser en gran parte, base de formación de lo que soy hoy en día.

A la Universidad Tecnológica de Pereira por brindarme la oportunidad de crecer con experiencias, como profesional y como persona, entre personas inigualables que nunca olvidaré.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que siempre creyeron en mí y en mis capacidades.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| RESUMEN | 14 |
| ABSTRACT | 15 |
| INTRODUCCIÓN..... | 16 |
| OBJETIVOS | 18 |
| CAPÍTULO I..... | 19 |
| CONCEPTOS TEÓRICOS | 19 |
| 1.1. Objetivo | 19 |
| 1.2. ¿Qué es HSM? | 19 |
| 1.3. ¿Qué es la manufactura? | 19 |
| 1.4. Procesos de manufactura | 20 |
| 1.5. Fresado..... | 22 |
| 1.4.1. Tipos de fresado | 23 |
| 1.5.2. Direcciones de rotación que puede tener la fresa respecto al trabajo | 24 |
| 1.5.3. Diversas formas del fresado frontal..... | 24 |
| 1.5.4. Condiciones de corte en fresado | 25 |
| 1.5.5. Fórmulas de fresado | 26 |
| 1.6. Mecanizado de alta velocidad (High Speed Machining) | 28 |
| 1.7. Estrategias de corte | 30 |
| 1.7.1. Estrategia convencional (Pocket) | 30 |
| 1.7.2. Estrategia HSM (Trocoide) | 30 |
| 1.7.3. Ventajas y desventajas de la estrategia trocoidal..... | 34 |
| 1.8. Maquinabilidad de los materiales | 35 |
| 1.9. Fallas y desgaste de herramientita de corte..... | 36 |

| | |
|--|----|
| 1.10. Causas de desgaste de la herramienta | 36 |
| CAPÍTULO II..... | 38 |
| DEFINICIÓN DE PARÁMETROS | 38 |
| 2.1. Objetivo | 38 |
| 2.2. Características de la maquina..... | 38 |
| 2.3. Características de la herramienta | 39 |
| 2.4. Características del material | 39 |
| 2.5. Parámetros de corte..... | 40 |
| 2.6. Características del fluido de corte..... | 42 |
| CAPÍTULO III | 43 |
| MODELADO Y PROGRAMACIÓN DE PROBETAS | 43 |
| 3.1. Objetivo | 43 |
| 3.2. Modelo tridimensional de probetas..... | 44 |
| 3.2.1. Modelo tridimensional de probeta de 4 pulgadas de diámetro exterior | 44 |
| 3.2.2. Modelo tridimensional de probeta de 5 pulgadas de diámetro exterior | 44 |
| 3.3. Exportación de modelo 3D CAD a software CAM | 45 |
| 3.3.1. Selección de postprocesador..... | 45 |
| 3.3.2. Material inicial..... | 45 |
| 3.3.3. Estrategia de corte | 46 |
| 3.3.4. Herramienta de corte | 47 |
| 3.3.5. Parámetros de corte | 47 |
| 3.3.6. Calculo y simulación de trayectorias de corte | 48 |
| CAPÍTULO IV | 50 |
| PRUEBAS Y RECOPIACIÓN DE DATOS ADQUIRIDOS | 50 |
| 4.1. Objetivo | 50 |

| | | |
|--|--|----|
| 4.2. | Montaje | 50 |
| 4.3. | Preparación de probetas | 51 |
| 4.4. | Estrategia convencional | 52 |
| 4.5. | Estrategia HSM..... | 54 |
| 4.6. | Recopilación de datos y comparación de estrategias | 56 |
| 4.7. | Acabado superficial | 57 |
| 4.8. | Estado de la herramienta | 58 |
| CAPÍTULO V | | 59 |
| RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | | 59 |
| 5.1. | Objetivo | 59 |
| 5.2. | Tiempo real de mecanizado | 59 |
| 5.3. | Régimen de arranque de viruta | 62 |
| 5.4. | Carga en el husillo | 65 |
| 5.5. | Análisis general..... | 66 |
| CONCLUSIONES..... | | 67 |
| RECOMENDACIONES | | 68 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 69 |

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones HAAS VF-2-A

Tabla 2. Especificaciones HAAS Vf-2-B

Tabla 3. Características herramienta de corte

Tabla 4. Composición química Aluminio 6061

Tabla 5. Propiedades físicas Aluminio 6061

Tabla 6. Consulta para determinación de parámetros de corte en estrategia convencional

Tabla 7. Parámetros de corte utilizados en la estrategia convencional

Tabla 8. Parámetros de corte utilizados en la estrategia HSM

Tabla 9. Refrigerante sintético HERRA-FLUID

Tabla 10. Parámetros de corte utilizados para estrategia convencional y estrategia HSM

Tabla 11. Comparación de resultados adquiridos

Tabla 12. Parámetros de corte

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Manufactura como proceso técnico

Figura 1.2 Clasificación de los procesos de manufactura

Figura 1.3 Clasificación de los procesos de remoción de material

Figura 1.4 Tipos básicos de la operación de fresado

Figura 1.5 fresado ascendente y fresado descendente.

Figura 1.6 Diversas formas del fresado frontal

Figura 1.7 Temperatura de la viruta en función de la velocidad de corte

Figura 1.8 Mecanizado convencional, dirige el calor al espacio del trabajo

Figura 1.9 HSM, dirige el calor a la viruta y lejos del espacio del trabajo

Figura 1.10 Fresado trocoidal

Figura 1.11 Representación profundidad de corte radial y corte axial

Figura 1.12 Adelgazamiento de viruta

Figura 1.13 Corte convencional en una esquina

Figura 1.14 Movimiento trocoidal

Figura 1.15 Desgaste de la herramienta en función de la velocidad de corte

Figura 2.1. Refrigerante sintético HERRA-FLUID

Figura 3.1 Proceso para la programación de trayectorias de corte

Figura 3.2 Probeta de 4 pulgadas de diámetro exterior

Figura 3.3 Probeta de 5 pulgadas de diámetro exterior

Figura 3.4 Selección de postprocesador

Figura 3.5 Configuración de material inicial

Figura 3.6 Estrategia de corte convencional (Pocket o Cajera)

Figura 3.7 Estrategia de corte HSM (Dynamic Mill o Trocoidal)

Figura 3.8 Definición de parámetros de herramienta de corte

Figura 3.9 Parámetros de corte estrategia convencional

Figura 3.10 Parámetros de corte estrategia HSM

Figura 3.11 Calculo y simulación de trayectorias de corte estrategias convencional y HSM

Figura 4.1 Montaje

Figura 4.2 Preparación de probetas

Figura 4.3 Probeta 1, 4 pulgadas de diámetro con estrategia convencional

Figura 4.4 Probeta 2, 4 pulgadas de diámetro con estrategia convencional

Figura 4.5 Probeta 3, 5 pulgadas de diámetro con estrategia convencional

Figura 4.6 Probeta 4, 5 pulgadas de diámetro con estrategia convencional

Figura 4.7 Probeta 5, 4 pulgadas de diámetro con estrategia HSM

Figura 4.8 Probeta 6, 4 pulgadas de diámetro con estrategia HSM

Figura 4.9 Probeta 7, 5 pulgadas de diámetro con estrategia HSM

Figura 4.10 Probeta 8, 5 pulgadas de diámetro con estrategia HSM

Figura 4.11 Comparación de acabado superficial entre estrategias de mecanizado convencional y estrategia HSM

Figura 4.12 Estado de la herramienta

Figura 5.1 Resultados tiempo real de mecanizado en aluminio 6061 probetas de 4 in diámetro exterior

Figura 5.2 Resultados tiempo real de mecanizado en aluminio 6061 probetas de 5 in diámetro exterior

Figura 5.3 Resultados régimen de arranque de viruta en aluminio 6061

Figura 5.4 Resultados carga en el husillo en aluminio 6061

LISTA DE SÍMBOLOS

V_c : Velocidad de corte [m/min] o [ft/min]

D : Diámetro mecanizado (diámetro del componente) [mm] o [in]

n : Velocidad del husillo [rpm]

f_z : Avance por diente [mm] o [in]

V_f : Avance de mesa [mm/min] o [in/min]

Z : Número de dientes efectivos [-]

f_n : Avance por revolución [mm/rev] o [in]

Q : Régimen de arranque de viruta [cm³/min] o [in³/min]

a_p : Profundidad de corte axial [mm] o [in]

a_e : Profundidad de corte radial [mm] o [in]

T_c : Tiempo de mecanizado [min]

l_m : Longitud de mecanizado [mm] o [in]

P_c : Potencia neta [kW] o [HP]

k_c : Fuerza de corte específico [N/mm²] o [N/in²]

RESUMEN

En este trabajo se plantea y desarrolla el estudio sobre el fresado de cavidades de fondo plano en aluminio 6061 mediante estrategia HSM (High Speed Machining) y su comparación con una estrategia de corte convencional, aplicando los parámetros y estrategias de corte normalmente empleadas, de tal modo que el proceso mejore los tiempos y resultados.

Actualmente en el mecanizado de cavidades se concentra el mayor número de horas de trabajo, y por eso una cantidad significativa de esfuerzos son empleados para reducir los tiempos y costos de producción [1] por esta razón es necesario un proyecto que ayude a entender mejor el proceso y proponer una solución de tal manera que estos problemas sean reducidos al máximo, mejorando el tiempo y la calidad de las piezas obtenidas. El objetivo general es, mejorar la productividad del proceso de fresado, la vida de la herramienta y el acabado superficial de cavidades de fondo plano en aluminio 6061 mediante el uso de estrategias de corte HSM (High Speed Machining).

Como producto de este trabajo, se busca mostrar los parámetros de corte escogidos y los resultados hallados para obtener mejores resultados en el proceso, que sean cuantificables y comparables con los datos iniciales, mostrando los cambios en los resultados del proceso.

ABSTRACT

In this work, the study on the milling of flat bottom cavities in 6061 aluminums by HSM (High Speed Machining) strategy and its comparison with a conventional cutting strategy, applying the most convenient parameters and cutting strategies found, is proposed and developed. so that the process improves times and results.

Currently the machining of cavities concentrates the largest number of hours of work, and therefore a significant amount of efforts is used to reduce the times and costs of production [1] for this reason is necessary a project that helps to understand the process and propose a solution where these problems are reduced to the maximum, improving the time and quality of the pieces obtained. The general objective is to improve the productivity of milling process, the life of the tool and the surface finish of flat bottom cavities in 6061 aluminums by using cutting strategies HSM (High Speed Machining).

As a product of this work, the aim is to show the chosen cutting parameters and the outcomes found to obtain better results in the process, which are quantifiable and comparable with the initial data, showing the changes in the results of the process.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad las compañías dedicadas a la fabricación de piezas están obligadas a reducir sus tiempos de producción para poder ser rentables y poder competir en el mercado actual, razón por la cual se buscan nuevas estrategias que ayuden a mejorar los procesos de manufactura; una de las estrategias actuales es el uso del HSM (High Speed Machining), mecanizado de alta velocidad, por sus siglas en inglés y, aunque no hay una definición clara se puede decir que es una combinación de muchas operaciones que hace referencia a técnicas como "lograr altas tasas de eliminación de metal con pasos de fresado rápidos" o "mecanizado a la frecuencia resonante de la máquina" [2]

El fresado consiste principalmente en el corte del material que se mecaniza con una herramienta rotativa de varios filos [3], una de las estrategias utilizadas es la estrategia de trocoides, la cual permite aumentar la velocidad de avance, lo que se traduce en un aumento de la tasa de remoción de material y, por consiguiente, en una mayor productividad de la máquina, la cual es la que se utiliza en este proyecto.

La ingeniería, ha intentado mejorar los indicadores de producción poniendo el conocimiento y la tecnología al servicio de la fabricación de piezas, debido a que el tiempo de operación y la calidad siempre son variables muy importantes las cuales dependen de múltiples factores que afectan su idoneidad, sin embargo, si bien en las últimas décadas se ha incrementado el desarrollo tecnológico para el mecanizado, el proceso aún se rige por los mismos principios mecánicos, lo que lleva a buscar métodos alternativos que arrojen los mejores resultados posibles con los mínimos sacrificios para así dar solución a los problemas que presenta el proceso convencional.

Es por lo que la Universidad Tecnológica de Pereira, en conjunto de la facultad de Ingeniería Mecánica y el semillero CNC, plantea el fresado de cavidades de fondo plano en aluminio 6061 mediante estrategia HSM (High Speed Machining) como una alternativa de mecanizado, este proyecto se desenvuelve en cinco etapas, descritas a continuación:

La primera etapa se desarrolla para realizará una búsqueda en artículos, libros y medios electrónicos con el fin de recopilar la mayor información posible y así poder tener los

conceptos sobre el mecanizado de alta velocidad, factores que afectan el mecanizado y análisis de las operaciones de fresado.

La segunda etapa se desarrolla para realizar la definición de los parámetros utilizados para realizar las pruebas con la estrategia de corte convencional y con la estrategia de corte HSM, en donde se documentarán los resultados con sus características, herramientas, materiales, parámetros de corte y fluido de corte para su posterior comparación.

La tercera etapa se desarrolla para realizar las pruebas con las especificaciones seleccionadas con el fin de ejecutar los ensayos y posteriormente recopilar los datos experimentales; Seguidamente, con los datos obtenidos en las pruebas realizadas en la fase anterior, se procederá a la respectiva tabulación y análisis; y posteriormente se realizarán tablas comparativas y gráficas para analizar los resultados obtenidos.

La cuarta etapa se centra en el análisis de resultados, es decir, se procede a analizar los resultados y que tan eficiente llega a ser la estrategia HSM comparada con la estrategia convencional.

La quinta y última etapa, se desarrolla para realizar el documento final de acuerdo con los parámetros exigidos por la Facultad de Ingeniería Mecánica para la presentación de este documento, en él se expondrá toda la información pertinente respecto al tema, los resultados, análisis de estos y conclusiones respecto al proyecto.

Con este proyecto se pretende favorecer la generación de conocimiento, servir para posteriores trabajos de grado en la facultad de Ingeniería Mecánica, la Escuela de Tecnología Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira y de igual manera, fortalecer y poner en práctica los conocimientos adquiridos en las diferentes áreas contempladas en el plan de estudios, principalmente en el área de manufactura.

OBJETIVOS

Objetivo general

Mejorar la productividad del proceso de fresado, la vida de la herramienta y el acabado superficial de cavidades de fondo plano en aluminio 6061 mediante el uso estrategias de corte HSM (High Speed Machining).

Objetivos específicos

- Identificar las características del aluminio 6061, parámetros de corte recomendados y los usados en las estrategias de corte convencionales.
- Realizar pruebas de mecanizado de cavidades de fondo plano utilizando estrategias de corte convencionales y estrategias HSM (High Speed Machining).
- Realizar mediciones de tiempo de mecanizado, estado de las herramientas y acabado de las superficies obtenidas en cada una de las estrategias utilizadas.
- Comparar los resultados obtenidos con las diferentes estrategias utilizadas.

CAPÍTULO I

CONCEPTOS TEÓRICOS

1.1. Objetivo

El presente capítulo se hace con el sentido de dar una visión de los diferentes conceptos teóricos y la información sobre los procesos de manufactura, análisis de fresado y los factores que afectan el mecanizado convencional y de alta velocidad.

1.2. ¿Qué es HSM?

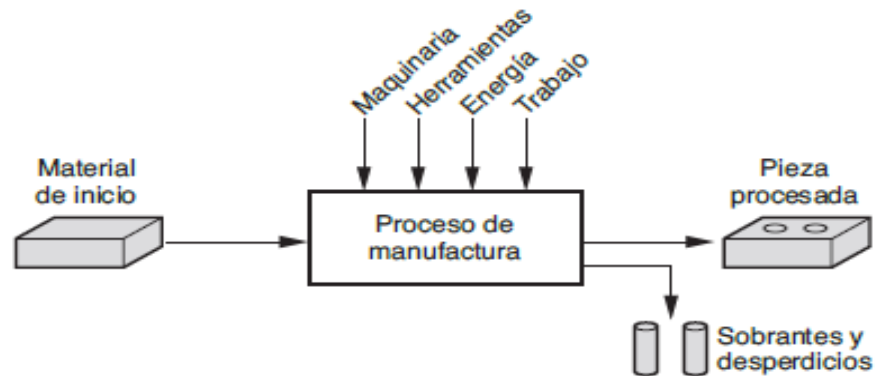
HSM (High Speed Machining), mecanizado de alta velocidad, por sus siglas en inglés significa utilizar velocidades de corte que sean significativamente más elevadas que las utilizadas en las operaciones de maquinado convencional, de igual forma se tienen otras definiciones que se enfocan en velocidades de producción más elevadas y tiempos más reducidos, en lugar de basarse en la funcionalidad de la velocidad del husillo. [4] también se puede decir que es "lograr altas tasas de eliminación de metal con pasos de fresado rápidos" y " mecanizado a la frecuencia resonante de la máquina " pero rompiendo el paradigma de pensar que la alta velocidad enfatiza en la utilización de husillos más rápidos ya que se ha descubierto que las técnicas de HSM pueden funcionar bien incluso en husillos de uso normal [2]

1.3. ¿Qué es la manufactura?

La palabra manufactura se deriva de las palabras latinas manus (mano) y factus (hacer); la combinación de ambas significa hecho a mano. La palabra manufactura tiene varios siglos de antigüedad, y “hecho a mano” describe en forma adecuada los métodos manuales que se utilizaban cuando se acuñó la expresión. [5] La manufactura, en su sentido más amplio, es el proceso de convertir la materia prima en productos. Incluye: El diseño del producto, la selección de la materia prima y la secuencia de procesos a través de los cuales será manufacturado el producto. [6] En el sentido tecnológico, la manufactura es la aplicación de procesos físicos y químicos para alterar la geometría, propiedades o apariencia de un material de inicio dado para fabricar piezas o productos; la manufactura también incluye el ensamble

de piezas múltiples para fabricar productos. Los procesos para llevar a cabo la manufactura involucran una combinación de máquinas, herramientas, energía y trabajo manual. Casi siempre, la manufactura se ejecuta como una secuencia de operaciones. Cada una de éstas lleva al material más cerca del estado final que se desea. [4] (Figura 1.1)

Figura 1.1 Manufactura como proceso técnico

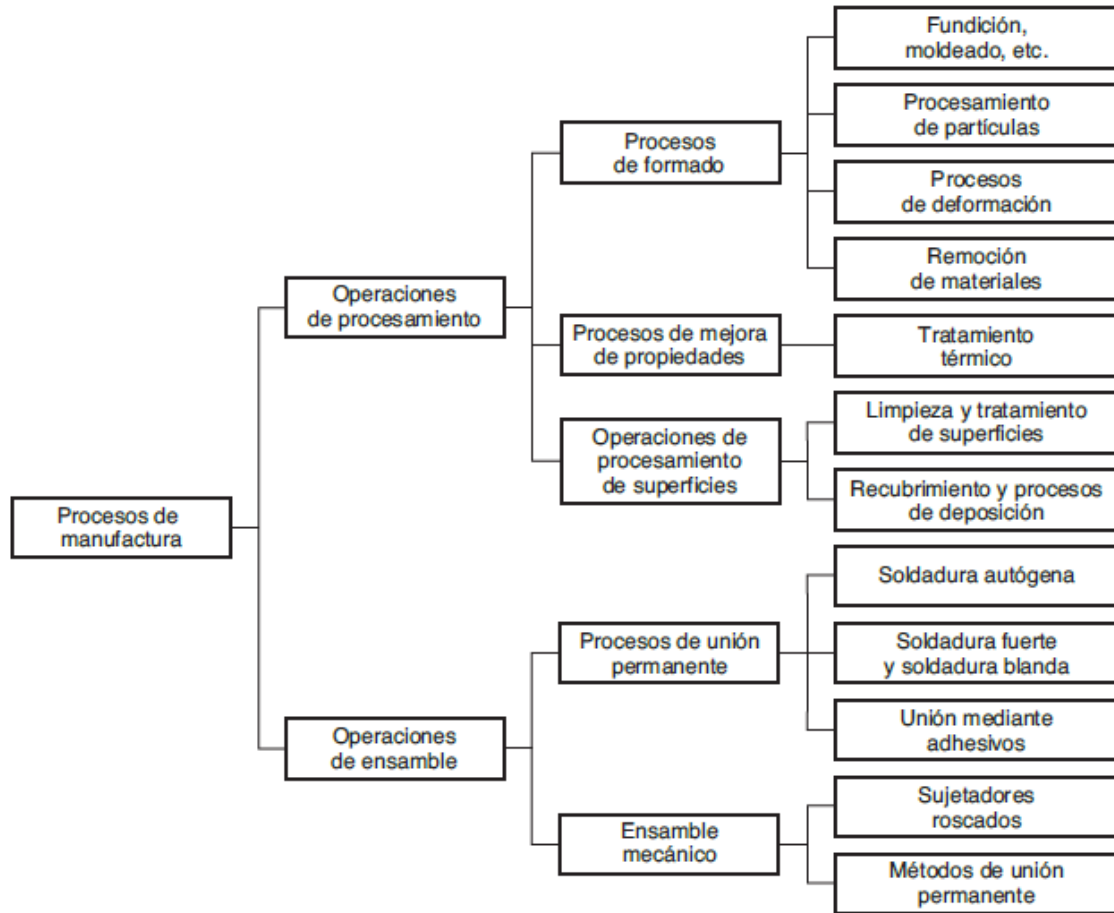


Fuente: Mikell P. Groover [4]

1.4. Procesos de manufactura

Los procesos de manufactura (Figura 1.2) se dividen en dos tipos básicos: 1) las operaciones del proceso, y 2) las del ensamblado. Una operación del proceso hace que un material de trabajo pase de un estado de acabado a otro más avanzado que está más cerca del producto final que se desea. Una operación de ensamblado une dos o más componentes a fin de crear una entidad nueva, llamada ensamble, sub - ensamble o algún otro término que se refiera al proceso de unión.

Figura 1.2 Clasificación de los procesos de manufactura

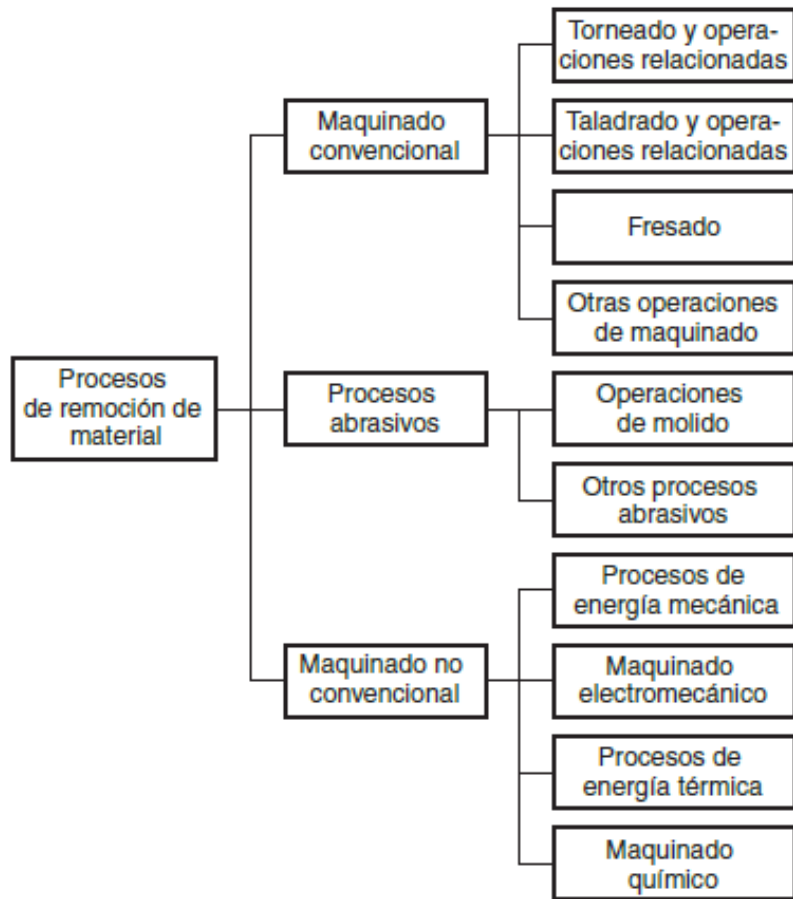


Fuente: Mikell P. Groover [4]

Para lo cual concierne al desarrollo del proyecto de investigación de fresado de cavidades de fondo plano en aluminio 6061 mediante estrategia HSM (High Speed Machining) nos centraremos en el proceso de manufactura, clasificado como remoción de material.

Los procesos de remoción de material (figura 1.3) son una familia de operaciones de formado en las que el material sobrante es removido de una pieza de trabajo inicial de tal manera que lo que queda es la forma final que se desea conseguir. El maquinado es un proceso de manufactura en el cual se usa una herramienta de corte para remover el exceso de material de una pieza de trabajo. El maquinado convencional, es en el que una herramienta aguda de corte se utiliza para cortar mecánicamente el material y así alcanzar la forma deseada, los tres procesos principales de maquinado son el torneado, el taladrado y el fresado. [4]

Figura 1.3 Clasificación de los procesos de remoción de material



Fuente: Mikell P. Groover [4]

Como se menciona en el objetivo general del proyecto, lo que se busca es mejorar la productividad del proceso de fresado, la vida de la herramienta y el acabado superficial de cavidades de fondo plano en aluminio 6061 mediante el uso de estrategias de corte HSM (High Speed Machinig) por lo cual dirigimos el estudio al fresado.

1.5. Fresado

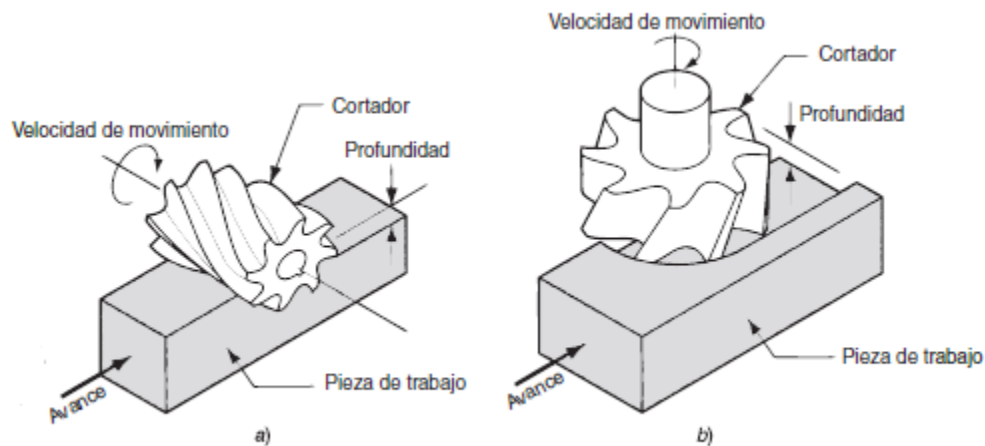
El fresado es una operación de maquinado en la cual se hace pasar una pieza de trabajo enfrente de una herramienta cilíndrica rotatoria con múltiples bordes o filos cortantes (en algunos casos raros se usa una herramienta con un solo filo cortante llamado fresa perfilada simple). El eje de rotación de la herramienta cortante es perpendicular a la dirección de

avance. La herramienta de corte en fresado se llama fresa o cortador para fresadora y los bordes cortantes se llaman dientes. La máquina herramienta que ejecuta tradicionalmente esta operación es una fresadora. El fresado es una operación de corte interrumpido; los dientes de la fresa entran y salen del trabajo durante cada revolución. Esto interrumpe la acción de corte y sujeta los dientes a un ciclo de fuerza de impacto y choque térmico en cada rotación

1.4.1. Tipos de fresado

Hay dos tipos básicos de operaciones de fresado, como se muestra en la figura 1.4: a) fresado periférico y b) fresado frontal. En el fresado periférico, también llamado fresado plano, el eje de la herramienta es paralelo a la superficie que se está maquinando y la operación se realiza por los bordes de corte en la periferia exterior del cortador. En el fresado frontal, el eje de la fresa es perpendicular a la superficie de trabajo y el maquinado se ejecuta cortando las orillas, tanto en el extremo como fuera de la periferia de la fresa.

Figura 1.4 Tipos básicos de la operación de fresado

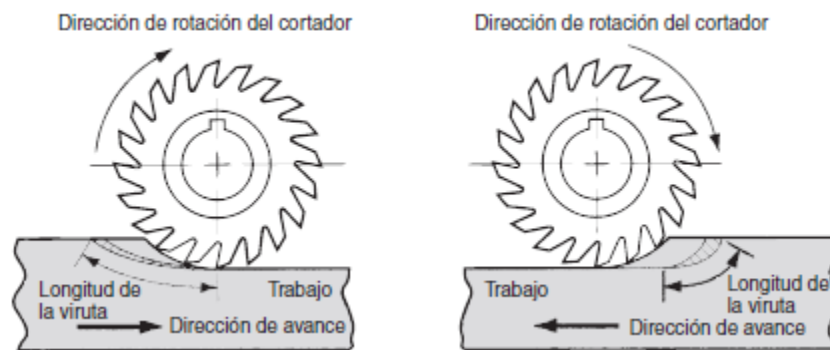


Fuente: Mikell P. Groover [4]

1.5.2. Direcciones de rotación que puede tener la fresa respecto al trabajo

Estas direcciones distinguen dos formas de fresado: fresado ascendente y fresado descendente, que se ilustran en la figura 1.5. En el fresado ascendente, también llamado fresado convencional, la dirección del movimiento de los dientes de la fresa es opuesto a la dirección de avance cuando los dientes cortan el trabajo. Es decir, cortan “contra el avance”. En el fresado descendente, también llamado fresado tipo escalamiento, la dirección del movimiento de la fresa es la misma que la dirección de avance cuando los dientes cortan el trabajo. Es un fresado “con el avance”.

Figura 1.5 fresado ascendente y fresado descendente.

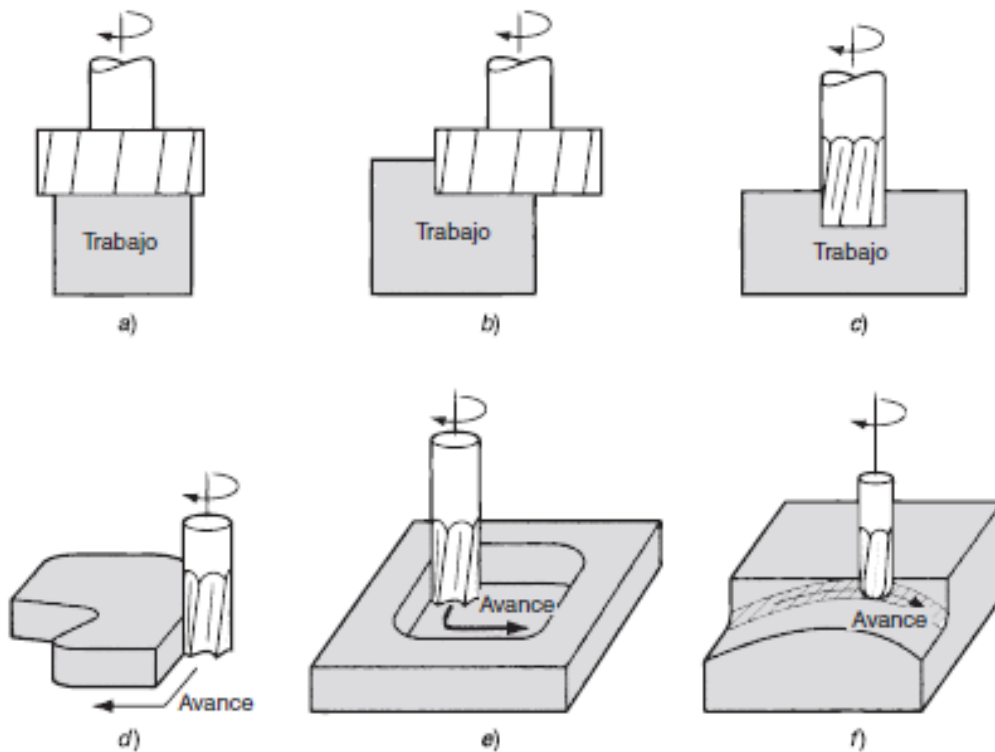


Fuente: Mikell P. Groover [4]

1.5.3. Diversas formas del fresado frontal

a) fresado frontal convencional, en el que el diámetro de la fresa es más grande que el ancho de la pieza de trabajo, de tal manera que la fresa sobrepasa al trabajo en ambos lados; b) fresado frontal parcial, en el que la fresa sobrepasa al trabajo solamente en un lado; c) fresado terminal, en el cual el diámetro de la fresa es menor que el ancho del trabajo, de manera que se corta una ranura dentro de la pieza; d) fresado de perfiles es una forma de fresado terminal en el cual se corta una pieza plana de la periferia; e) fresado de cavidades, otra forma de fresado terminal usada para fresar cavidades poco profundas en piezas planas; f) fresado de contorno superficial, en el cual una fresa con punta de bola (en lugar de una fresa cuadrada) se hace avanzar hacia delante y hacia atrás, y hacia un lado y otro del trabajo, a lo largo de una trayectoria curvilínea a pequeños intervalos para crear una superficie tridimensional.[4]

Figura 1.6 Diversas formas del fresado frontal



Fuente: Mikell P. Groover [4]

1.5.4. Condiciones de corte en fresado

- Velocidad de corte (V_c): Indica la velocidad superficial a la que el filo mecaniza la pieza.
- Velocidad del husillo (n): El número de vueltas por minuto que realiza la herramienta de fresado en el husillo. Se trata de un valor orientativo que se calcula a partir de la velocidad de corte recomendada para la operación. [8]
- Avance (f_z): También llamado carga de viruta, representa el tamaño de la viruta formada por cada filo de corte. Esto se puede convertir a velocidad de avance, tomando en cuenta la velocidad del husillo y el número de dientes en la fresa. La remoción de material en el fresado se determina usando el producto del área de la sección transversal del corte por la velocidad de avance. [4]

- Avance por revolución (f_n): Un valor auxiliar que indica cuánto se desplaza la herramienta en una rotación completa. Se usa específicamente para los cálculos de avance y, a menudo, para determinar la capacidad de acabado de una fresa.
- Avance por minuto (V_f): También se denomina avance de mesa, avance de máquina o velocidad de avance. Es el avance de la herramienta con relación a la pieza de trabajo en la distancia por unidad de tiempo relacionada con el avance por diente y el número de dientes en la fresa.
- Régimen de arranque de viruta (Q): El volumen de metal eliminado. Se determina usando los valores de avance, ancho y profundidad de corte.
- Tiempo de mecanizado (T_c): Longitud de mecanizado (l_m) dividida entre el avance de mesa (V_f)
- Fuerza de corte específica (k_{ct}): Una constante importante. Factor empleado para cálculos de potencia expresado en N/mm²
- Potencia neta (P_c): Valore orientado hacia la máquina-herramienta que ayuda a calcular la potencia neta para garantizar que la máquina es lo suficientemente resistente para la fresa y la operación. [8]

1.5.5. Fórmulas de fresado

- **Sistema Métrico**

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$f_z = \frac{V_f}{n \times Z} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$f_n = \frac{V_f}{n} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$V_f = f_z \times n \times Z \quad \text{Ecuación 5}$$

$$Q = \frac{a_p \times a_e \times V_f}{1000} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$T_c = \frac{l_m}{V_f} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$P_c = \frac{a_e \times a_p \times V_f \times k_c}{60 \times 10^6} \quad \text{Ecuación 8}$$

- **Sistema Imperial**

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{12} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$n = \frac{V_c \times 12}{\pi \times D} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$f_z = \frac{V_f}{n \times Z} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$f_n = \frac{V_f}{n} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$V_f = f_z \times n \times Z \quad \text{Ecuación 13}$$

$$Q = a_p \times a_e \times V_f \quad \text{Ecuación 14}$$

$$T_c = \frac{l_m}{V_f} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$P_c = \frac{a_e \times a_p \times V_f \times k_c}{396 \times 10^3} \quad \text{Ecuación 16}$$

V_c : Velocidad de corte

Q : Régimen de arranque de viruta

D : Diámetro mecanizado (diámetro del componente)

a_p : Profundidad de corte axial

a_e : Profundidad de corte radial

n : Velocidad del husillo

T_c : Tiempo de mecanizado

f_z : Avance por diente

l_m : Longitud de mecanizado

V_f : Avance de mesa

P_c : Potencia neta

Z : Número de dientes efectivos

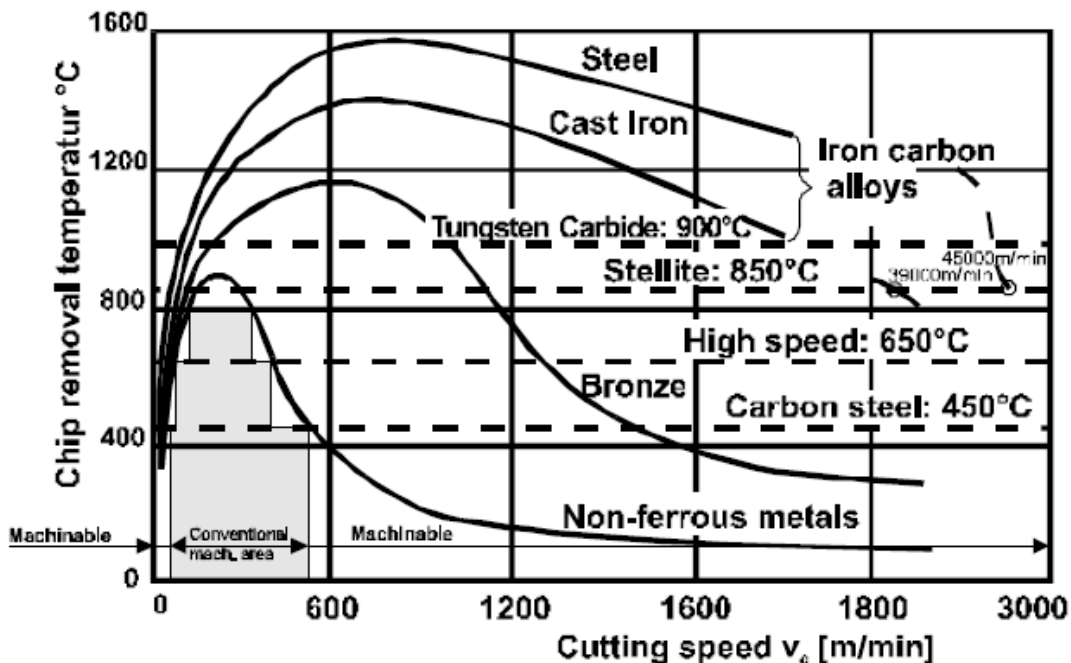
k_c : Fuerza de corte específico

f_n : Avance por revolución

1.6. Mecanizado de alta velocidad (High Speed Machining)

El mecanizado con altas velocidades (HSM) es una de las tecnologías modernas que, en comparación con corte convencional permite aumentar la precisión, eficiencia, calidad de las piezas de trabajo, aumentar la vida de la herramienta y disminuir los costos y el tiempo de mecanizado. A pesar de que el mecanizado de alta velocidad se conoce desde hace mucho tiempo (los primeros intentos se hicieron a principios de los años veinte del siglo pasado) todavía hay un montón de preguntas y complicadas definiciones de HSM (High Speed Machining). La primera definición de HSM (High Speed Machining) fue propuesta por Carl Salomon en 1931, ha supuesto que en una cierta velocidad de corte que es 5 -10 veces más alta que en el mecanizado convencional, la temperatura en la generación de viruta comenzara a disminuir

Figura 1.7 Temperatura de la viruta en función de la velocidad de corte



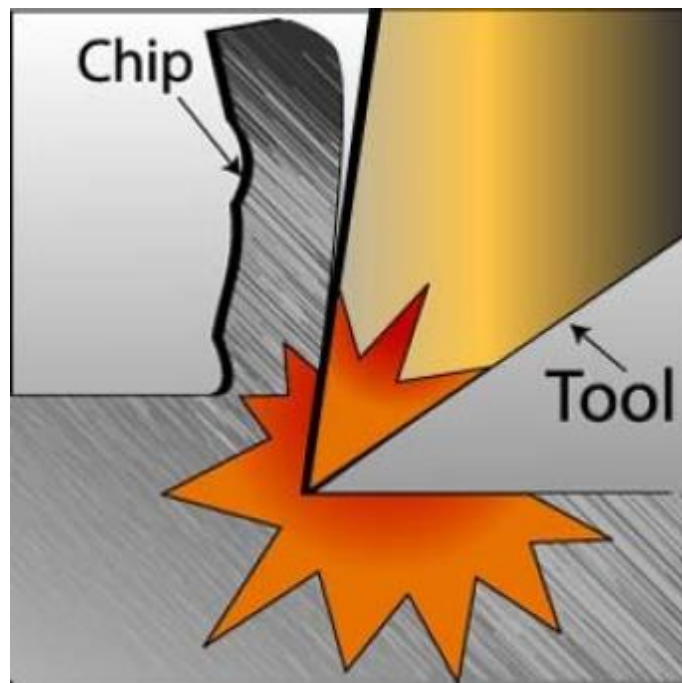
Fuente. Pasko, R. - Przybylski, L. & Slodki, B. [9]

El HSM (High Speed Machining) no es simplemente un proceso de alta velocidad de corte, se considera como un proceso donde las operaciones se realizan con métodos específicos de tal manera que se logren altas tasas de eliminación de material y un acabado superficial lo

suficientemente bueno como para llamarlo terminado en una sola pasada, no solo está enfocado con el mecanizado con alta velocidad de giro ya que también existen muchas aplicaciones que son realizadas con velocidades de husillo convencionales. HSM (High Speed Machining) se puede definir más bien como el mecanizado altamente productivo [9] o se puede decir que es "lograr altas tasas de eliminación de metal con pasos de fresado rápidos" y " mecanizado a la frecuencia resonante de la máquina " [2]

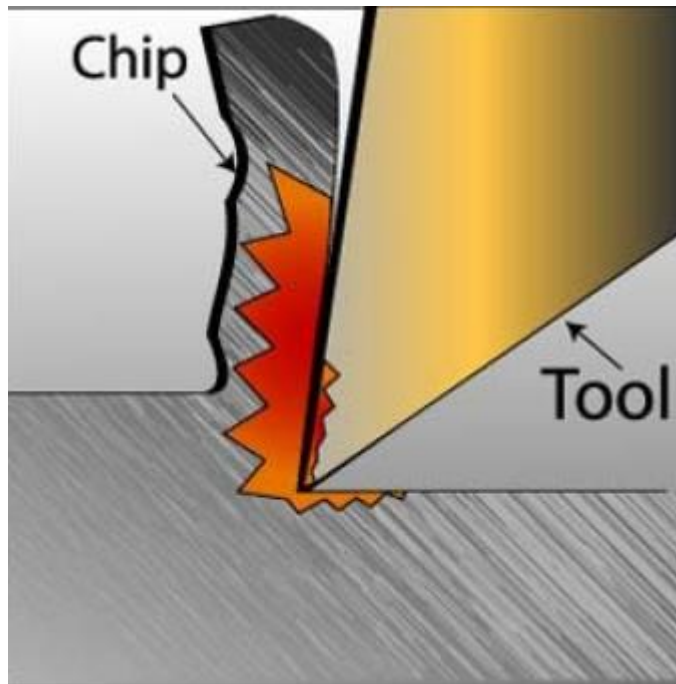
El mecanizado de alta velocidad ofrece la posibilidad de aumentar la productividad, mejorar la calidad superficial de la pieza y reducir las fuerzas de mecanizado y tales efectos resultan por la reducción de la generación de calor durante el corte, la reducción del tiempo de contacto entre la herramienta y la superficie de la pieza de trabajo. [10]

Figura 1.8 Mecanizado convencional, dirige el calor al espacio del trabajo



Fuente: ToolingU Confidence to compete [11]

Figura 1.9 HSM, dirige el calor a la viruta y lejos del espacio del trabajo



Fuente: ToolingU Confidence to compete [11]

1.7. Estrategias de corte

1.7.1. Estrategia convencional (Pocket)

Es una operación de mecanizado que se ejecuta para remover material, el avance de la fresa sigue un recorrido inicial de rampa circular hasta una profundidad específica, seguidamente con un desplazamiento en los ejes X y Y, que se utiliza a menudo para abrir cavidades

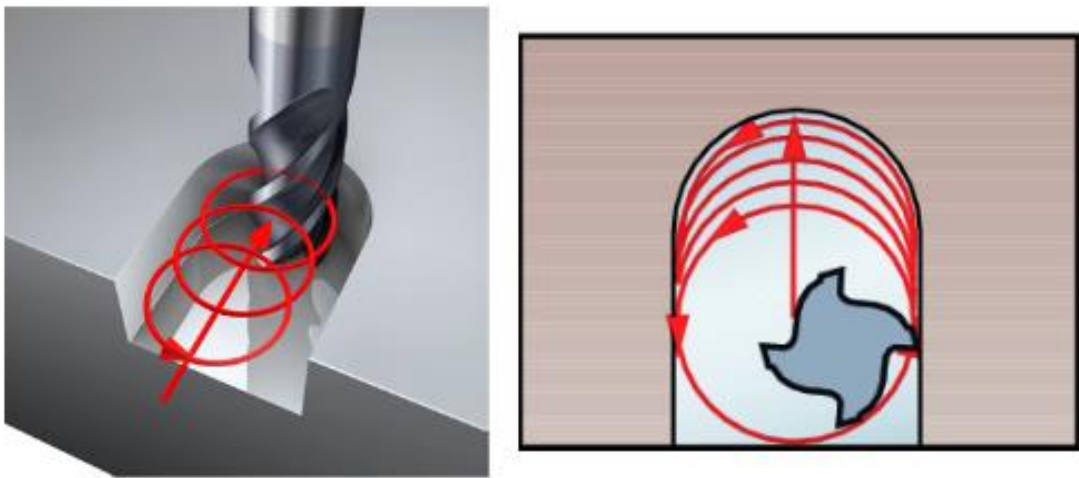
1.7.2. Estrategia HSM (Trocoide)

El fresado trocoidal se puede definir como un fresado circular que incluye desplazamiento simultáneo hacia delante. La fresa elimina sucesivos "recortes" de material en una serie de recorridos continuos en espiral siguiendo la dirección radial.

- El arco de empañe controlado genera fuerzas de corte bajas y esto permite elevar la profundidad de corte axial.

- Se utiliza toda la longitud del filo y por ello calentamiento y desgaste son uniformes y distribuidos, la vida útil de la herramienta será mayor que con el fresado de ranuras tradicional.
- Debido al corto arco de empañe, se utilizan herramientas de varios filos y esto permite incrementar el avance de mesa sin perder seguridad respecto a la vida útil de la herramienta.
- El máximo corte radial, a_e , no debe superar el 20% del diámetro de la fresa. [8]

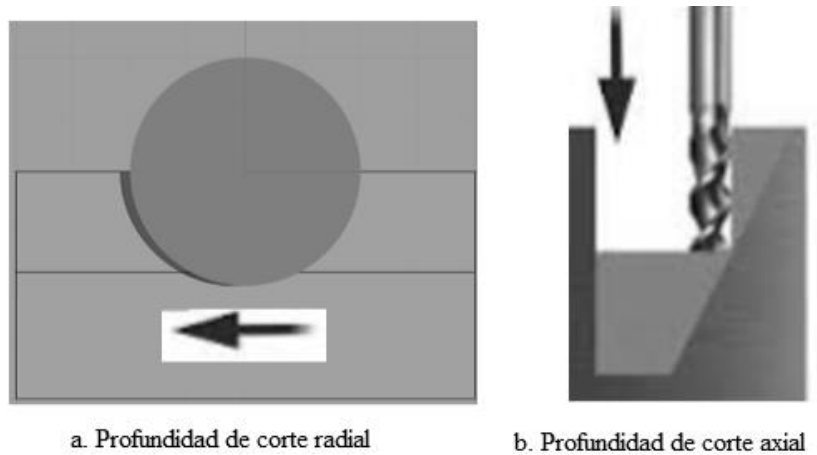
Figura 1.10 Fresado trocoidal



Fuente: Sandvik Coromant [8]

En la estrategia de corte utilizada para el mecanizado de alta velocidad, ya definida como trocoidal lo que se busca es disminuir su profundidad de corte radial. Estas profundidades radiales bajas permiten que la herramienta tenga una mayor holgura de astillas y tiempo para enfriarse en el aire, lo que permite una productividad mucho mayor, especialmente en materiales más duros. De igual forma se busca aumentar su profundidad de corte axial. Estas profundidades altas se usan porque se utiliza toda la longitud del filo y por ello el calentamiento y desgaste son uniformes y distribuidos, la vida útil de la herramienta será mayor que con el fresado tradicional.

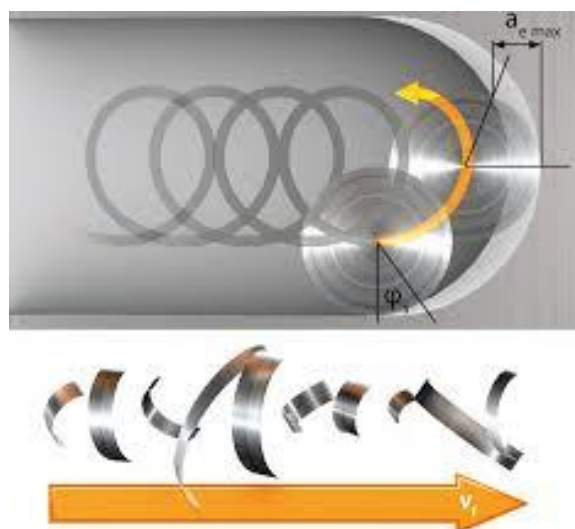
Figura 1.11 Representación profundidad de corte radial y corte axial



Fuente: CNC Cookbook [2]

Uno de los problemas que se encuentra al practicar HSM (High Speed Machining) con una profundidad de corte radial bajo es el adelgazamiento de las virutas, debido al corte poco profundo se crean virutas muy delgadas que, en un corte profundo completo, en el peor de los casos estas virutas demasiadas delgadas provocan frotamientos y bruñidos, que calientan la herramienta y la desgasta dramáticamente más rápido.

Figura 1.12 Adelgazamiento de viruta

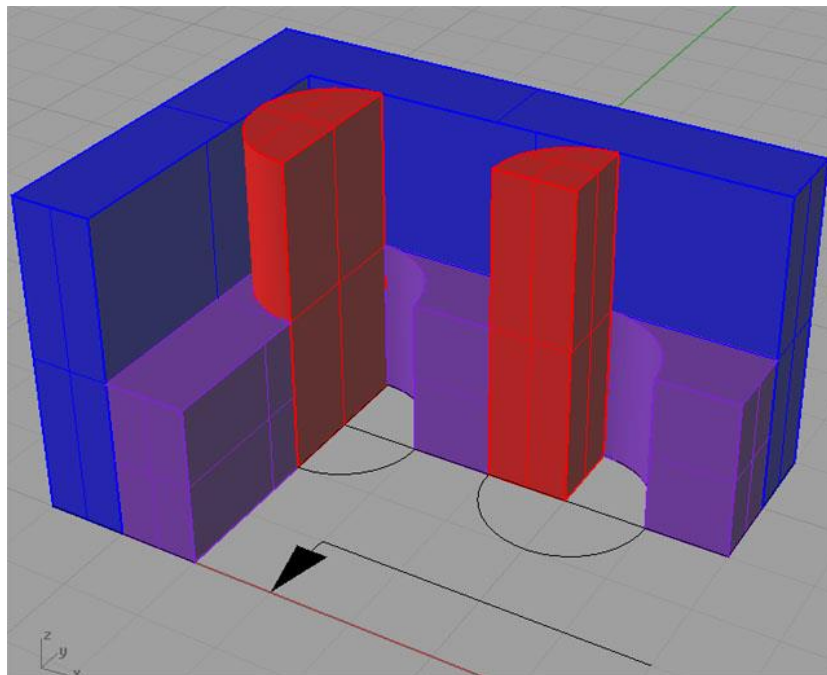


Fuente: Sandvik Coromant [8]

En la técnica convencional cada vez que se pasa de cortar en línea recta a cambiar de dirección en una esquina, se generan conflictos, esto es fácil de ver en la figura 1.13, la flecha muestra la dirección de corte a medida que avanza, como se puede ver, avanzar a la esquina duplica el ángulo de aplicación de la herramienta. Cuando eso sucede, las fuerzas de corte se duplican, la capacidad de eliminar virutas se reduce y la cantidad de tiempo que un filo pasa en el aire dónde puede liberar calor también se reduce.

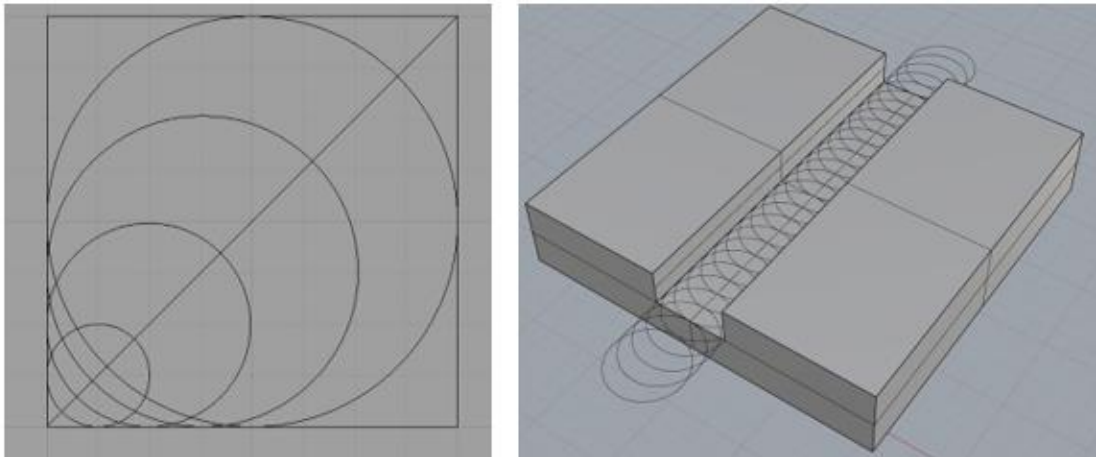
Esto se reduce en la estrategia de corte trocoidal con el movimiento de arcos en lugar de cortar hacia una esquina, realizando una serie de movimientos de bucle que corten pequeñas capas en diagonal como se muestra en la figura 1.14. El problema es que este tipo de cortes son capaces de impulsar la herramienta lo suficientemente rápido, que necesita una maquina potente y con estabilidad que respalde las grandes vibraciones. [2]

Figura 1.13 Corte convencional en una esquina



Fuente: CNC Cookbook [2]

Figura 1.14 Movimiento trocoidal



Fuente: CNC Cookbook [2]

1.7.3. Ventajas y desventajas de la estrategia trocoidal

- **Ventajas:**

- Alta tasa de eliminación de material.
- Alto acabado superficial.
- Mayor productividad.
- Posibilidad de mecanizar paredes muy delgadas.
- Reducción del tiempo de entrega.
- Baja fuerza de corte
- La herramienta de corte y la pieza de trabajo se mantienen en bajas temperatura
- El tiempo de conexión entre el filo y la pieza de trabajo es corto.

- **Desventajas:**

- Necesidad de máquinas-herramienta costosas y especiales con husillo y controladores avanzados
- Desgaste excesivo de la herramienta
- Buen trabajo y planificación de procesos necesarios.
- Puede ser difícil encontrar y contratar personal avanzado [12]

1.8. Maquinabilidad de los materiales

La propiedad de los materiales de dejarse maquinar con herramientas de corte se denomina maquinabilidad, La facilidad con que un material puede ser mecanizado depende de un gran número de factores que influye la maquinabilidad, se presenta en una lista subdivida con cinco grupos:

- **Variables dependientes de la máquina:**

- Rigidez estática de la máquina, de porta herramientas y de dispositivos de sujeción de la pieza
- Rigidez dinámica, amortiguamiento y frecuencias propias de vibración
- Potencia y fuerza de corte disponibles en la punta de la herramienta
- Gama de velocidades de corte de avance

- **Variables dependientes de la herramienta:**

- Geometría de la herramienta: Ángulos, radios de filos, dimensiones, forma de filo
- Material de la herramienta: Composición química, dureza en caliente, tenacidad, tratamiento térmico
- Calidad de filo: Grado de afilado, desgaste, rugosidad de raca o de los flancos

- **Variables dependientes de la pieza:**

- Formas, dimensiones, rigidez de la pieza
- Propiedades físicas, químicas y mecánicas del material de la pieza
- Temperatura de la pieza (maquinabilidad en bajas y altas temperaturas)

- **Variables dependientes del fluido de corte:**

- Propiedades refrigerantes
- Propiedades lubricantes
- Temperatura de fluido
- Forma e intensidad de aplicación

- **Variables dependientes del proceso:**

- Velocidad de corte

- Dimensiones de mecanizado (avance, profundidad)
- Modo de ataque de la herramienta sobre la pieza (condiciones de entrada y salida, corte continuo o interrumpido)

1.9. Fallas y desgaste de herramientita de corte

Una falla de una herramienta de corte puede ocurrir sobre tres formas distintas:

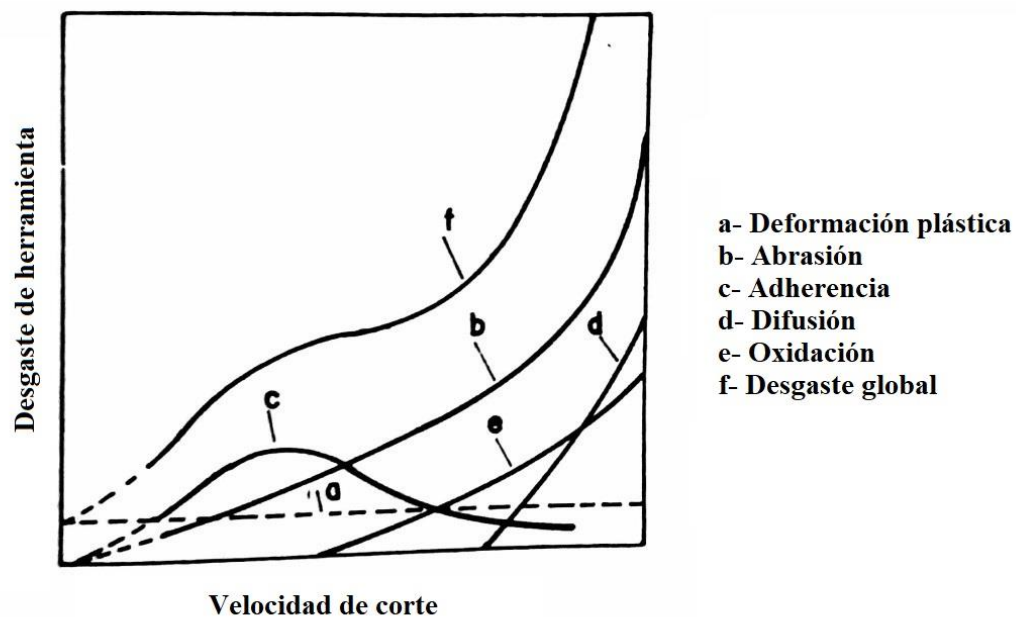
- **Astillamiento** de filo, quebradura de pedazos de filos, producción de superficies ásperas e irregulares: Es debido a:
 - Herramienta poco resistente
 - Sobre sollicitaciones mecánicas
 - Sobre sollicitaciones térmicas
- **Marca de desgaste**, desgaste en flanco (superficie de incidencia) formando una marca de desgaste: Es una franja desgastada en el flanco de la herramienta. En general no es uniforme, mayor en los extremos y en la punta de la herramienta. Una marca de desgaste irregular es debido normalmente a un micro astillamiento de filo.
- **Cráter**, desgaste en la cara (superficie de salida) generando la forma de un cráter: Es una concavidad que se forma en la cara de la herramienta debido a la fricción de esta con la viruta. Los cráteres se caracterizan por su profundidad y distancia media al filo. El colapso de la herramienta puede darse por el cráter, por la marca de desgaste o por el efecto combinado.

1.10. Causas de desgaste de la herramienta

- **Deformación plástica:** Ocurre cuando la dureza en caliente del material de la herramienta no es suficiente para resistir las presiones del mecanizado, lo que ocurre especialmente con mayores avances

- **Abrasión:** También conocido como arrancamiento de finas partículas de material, en consecuencia, del deslizamiento bajo altas presiones y temperaturas entre la pieza y la herramienta
- **Adherencia:** Sucede entre el material de la pieza y las ásperas superficies de herramientas. Se debe a la acción de altas temperaturas y presiones en la zona caliente
- **Difusión:** Ocurre con las temperaturas más elevadas, en las que las moléculas adquieren cierta movilidad
- **Oxidación:** Ocurre por el calentamiento de piezas a altas temperaturas con formación de capas. [13]

Figura 1.15 Desgaste de la herramienta en función de la velocidad de corte: a) Deformación plástica, b) Abrasión, c) Adherencia, d) Difusión, e) Oxidación, f) Desgaste global



Fuente: Stemmer, Caspar Erich [13]

CAPÍTULO II

DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

2.1. Objetivo

El siguiente capítulo se hace con el fin de puntualizar los parámetros utilizados para la realización de las pruebas con la estrategia de corte convención y con la estrategia de corte HSM, se documenta las características de la máquina, la herramienta, el material, parámetros de corte y fluido de corte utilizado en el proceso.

2.2. Características de la maquina

HAAS VF-2: Centro de mecanizado vertical; 30" x 16" x 20" (762 x 406 x 508 mm), cono ISO 40, accionamiento vectorial de 30 hp (22,4 kW), 8.100 rpm, acoplamiento directo, cambiador de herramientas automático de 20 estaciones de tipo carrusel, avances rápidos de 1.000 pulg. /min. (25,4 m/min.), módulo de detección de fallos eléctricos, memoria de programación de 1 GB, monitor LCD de color de 15", puerto USB, llave para bloquear la memoria, roscado rígido y sistema de refrigeración por inmersión de 55 galones (208 litros). [14]

Tabla 1. Especificaciones HAAS VF-2-A [14]

| RECORRIDOS | S.A.E. | MÉTRICO |
|---|---------------------|---------------------|
| Eje X | 30 " | 762 mm |
| Eje Y | 16 " | 406 mm |
| Eje Z | 20 " | 508 mm |
| Plato adaptador a superficie de mesa (~ máx.) | 24 " | 610 mm |
| Plato adaptador a superficie de mesa (~ mín.) | 4 " | 102 mm |
| MESA | S.A.E. | MÉTRICO |
| Longitud | 36 " | 914 mm |
| Anchura | 14 " | 356 mm |
| Anchura de ranuras en T | 5/8 " | 16 mm |
| Distancia entre ejes de ranura en T | 4.92 " | 125.0 mm |
| Número de ranuras en T estándares | 3 | 3 |
| Peso máx. en mesa (distribuido uniformemente) | 3000 lb | 1361 kg |
| HUSILLO | S.A.E. | MÉTRICO |
| Potencia máx. | 30 hp | 22.4 kW |
| Velocidad máx. | 8100 rpm | 8100 rpm |
| Par máx. | 90 ft-lb @ 2000 rpm | 122 Nm @ 2000 rpm |
| Sistema de accionamiento | Inline Direct-Drive | Inline Direct-Drive |
| Par máx. con caja de engranajes opc. | 250 ft-lb @ 450 rpm | 339 Nm @ 450 rpm |
| Cono | CT or BT 40 | CT or BT 40 |
| Lubricación de los rodamientos | Air/Oil Injection | Air/Oil Injection |
| Refrigeración | Liquid Cooled | Liquid Cooled |

Tabla 2. Especificaciones HAAS Vf-2-B [14]

| AVANCES | S.A.E. | MÉTRICO |
|--|--------------------------|--------------------------|
| Rápidos en X | 1000 in/min | 25.4 m/min |
| Rápidos en Y | 1000 in/min | 25.4 m/min |
| Rápidos en Z | 1000 in/min | 25.4 m/min |
| Corte máx. | 650 in/min | 16.5 m/min |
| MOTORES DE LOS EJES | S.A.E. | MÉTRICO |
| Empuje máx. X | 2550 lb | 11343 N |
| Empuje máx. Y | 2550 lb | 11343 N |
| Empuje máx. Z | 4200 lb | 18683 N |
| CAMBIADOR DE HERRAMIENTAS | S.A.E. | MÉTRICO |
| Tipo | Carousel (SMTC Optional) | Carousel (SMTC Optional) |
| Capacidad | 20 | 20 |
| Diámetro máx. de herramienta (ocupado) | 3.5 " | 89 mm |
| Peso máx. de herramienta | 12 lb | 5.4 kg |
| CARACTERÍSTICAS GENERALES | S.A.E. | MÉTRICO |
| Aire necesario | 4 scfm, 100 psi | 113 L/min, 6.9 bar |
| Capacidad de refrigeración | 55 gal | 208 L |

2.3. Características de la herramienta

Para el desarrollo de las pruebas de mecanizado de cavidades de fondo plano utilizando estrategias de corte convencional y estrategias HSM, y con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con las diferentes estrategias se utilizó el mismo tipo de herramienta en ambas estrategias. El tipo de herramienta se describe a continuación:

Tabla 3. Características herramienta de corte

| Herramienta de corte | |
|------------------------|----------------------|
| Tipo | Fresa de punta plana |
| Diámetro de corte [mm] | 6 |
| Longitud de corte [mm] | 25 |
| Numero de filos | 2 |
| Material | Metal duro grado P20 |

2.4. Características del material

El aluminio 6061 utilizado para la realización de las pruebas es una de las aleaciones más comunes y de uso general, está constituido por una serie de características, de las cuales la composición química y las propiedades físicas se describe a continuación:

Tabla 4. Composición química Aluminio 6061 [15]

| Composición química | | |
|---------------------|---------|--------|
| Elemento | Min (%) | Max(%) |
| Silicio (Si) | 0,4 | 0,8 |
| Hierro (Fe) | - | 0,7 |
| Cobre (Cu) | 0,15 | 0,4 |
| Manganeso (Mn) | - | 0,15 |
| Magnesio (Mg) | 0,8 | 1,2 |
| Cromo (Cr) | 0,04 | 0,35 |
| Zinc (Zn) | - | 0,25 |
| Titanio (Ti) | - | 0,15 |
| Otros elementos | 0,05 | 0,15 |
| Aluminio (Al) | Resto | |

Tabla 5. Propiedades físicas Aluminio 6061 [15]

| Propiedades físicas | |
|--------------------------------------|---------|
| Módulo elástico [N/mm ²] | 70 |
| Densidad [g/cm ³] | 2,7 |
| Intervalo de fusión [°C] | 580-650 |
| Módulo de elasticidad [MPa] | 69500 |
| Coeficiente de Poisson | 0,33 |
| Dureza Brinell | 65 |
| Resistencia a la tracción [Mpa] | 310 |
| Resistencia a la cizalladura [Mpa] | 190 |

2.5. Parámetros de corte

Para la determinación de los parámetros de corte utilizados convencionalmente se realizó una consulta en diferentes tipos de talleres metalmecánicos, donde se examinaron los diferentes parámetros de cortes utilizados, y con una tabulación de los datos recopilados se llegó a establecer los valores adecuados para la ejecución de las pruebas

Tabla 6. Consulta para determinación de parámetros de corte en estrategia convencional

| Taller mecánico 1 | | |
|-----------------------------|-------------|------|
| Velocidad del husillo | n [rpm] | 3600 |
| Avance por minuto | Vf [mm/min] | 450 |
| Profundidad de corte axial | ap [mm] | 0,4 |
| Profundidad de corte radial | ae [%] | 60% |
| Taller mecánico 2 | | |
| Velocidad del husillo | n [rpm] | 4000 |
| Avance por minuto | Vf [mm/min] | 600 |
| Profundidad de corte axial | ap [mm] | 0,6 |
| Profundidad de corte radial | ae [%] | 80% |
| Taller mecánico 3 | | |
| Velocidad del husillo | n [rpm] | 3900 |
| Avance por minuto | Vf [mm/min] | 590 |
| Profundidad de corte axial | ap [mm] | 0,5 |
| Profundidad de corte radial | ae [%] | 75% |

Con los datos recopilados y después de su debida tabulación se llegó a la conclusión sobre los parámetros de corte que se utilizaron en la estrategia convencional para la realización de las pruebas como se muestra a continuación:

Tabla 7. Parámetros de corte utilizados en la estrategia convencional

| Estrategia convencional | | |
|-----------------------------|-------------|------|
| Velocidad del husillo | n [rpm] | 3800 |
| Avance por minuto | Vf [mm/min] | 550 |
| Profundidad de corte axial | ap [mm] | 0,5 |
| Profundidad de corte radial | ae [%] | 70% |

Tabla 8. Parámetros de corte utilizados en la estrategia HSM

| Estrategia HSM | | |
|-----------------------------|-------------|------|
| Velocidad del husillo | n [rpm] | 7427 |
| Avance por minuto | Vf [mm/min] | 1200 |
| Profundidad de corte axial | ap [mm] | 16 |
| Profundidad de corte radial | ae [%] | 8% |

2.6. Características del fluido de corte

Refrigerante sintético HERRA-FLUID, refrigerante, lubricante, antioxidante para mecanizado con altas velocidades de corte en operaciones de mecanizado general de materiales ferrosos y no ferrosos. Biodegradable, concentración de uso entre 6% - 10% compuesto de Poliacrilicos, Polyolefinicos, Linoleicos, con Biocidas y Antiespumantes. [16]

Tabla 9. Refrigerante sintético HERRA-FLUID

| Refrigerante sintético HERRA-FLUID | |
|------------------------------------|-------|
| Densidad [g/ml ³] | 103 |
| Color | Verde |
| P.H. | 9,5 |
| Aroma | Suave |
| Flameable | No |
| Punto de evaporación [°C] | 125 |

Figura 2.1. Refrigerante sintético HERRA-FLUID



Fuente: Herratec – Colombia [16]

CAPÍTULO III

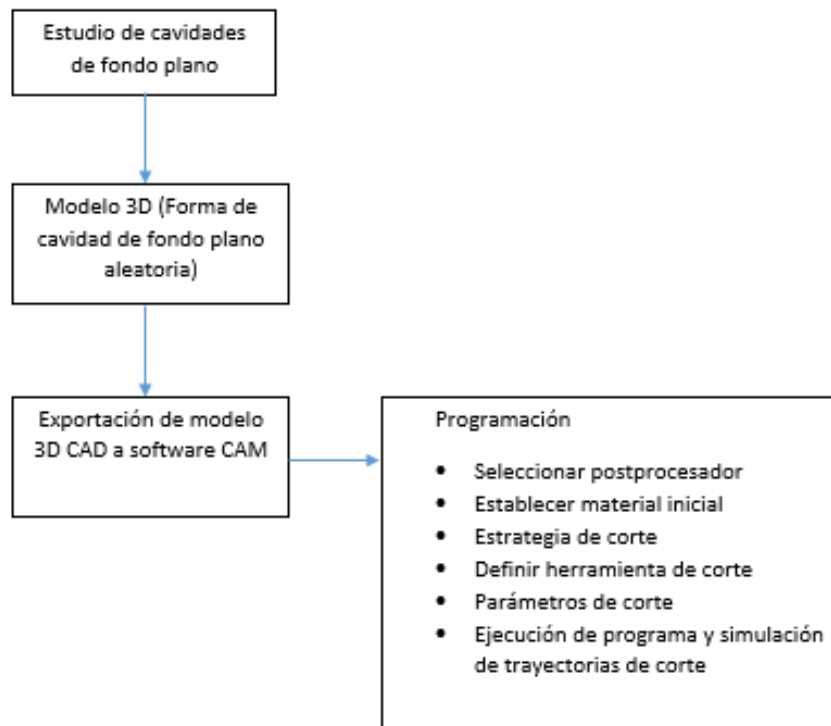
MODELADO Y PROGRAMACIÓN DE PROBETAS

3.1. Objetivo

El presente capítulo es con el objetivo de modelar las probetas utilizadas en el desarrollo del proyecto, de 4 pulgadas y 5 pulgadas de diámetro exterior por medio de un programa CAD y plantear el tipo de programación de las trayectorias de corte con un programa CAM.

El modelo de las probetas utilizadas para las pruebas se realiza mediante un software CAD, el cual es una herramienta computacional de diseño asistido por computador que permite a ingenieros y diseñadores realizar modelos 3D con el fin de tener una visión rápida de lo que se pretende hacer. La programación se realiza con la ayuda de un software CAM, que es una herramienta computacional de fabricación asistida por computador. Lo anteriormente descrito se ejecuta con la siguiente secuencia:

Figura 3.1 Proceso para la programación de trayectorias de corte



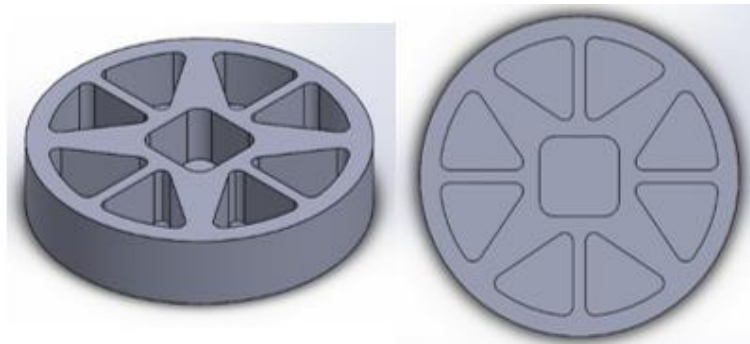
3.2. Modelo tridimensional de probetas

La definición del modelo tridimensional de cada probeta se realiza de forma aleatoria, es decir, se toman figuras de formas de cavidades de fondo plano y se crean nuevas formas que no tienen ninguna relación con las anteriormente mencionadas, siendo así formas fortuitas que conducen a resultados generales.

3.2.1. Modelo tridimensional de probeta de 4 pulgadas de diámetro exterior

La siguiente figura es un modelo tridimensional de lo que es la probeta de 4 pulgadas de diámetro exterior, es un bloque de aluminio 6061 con 9 cavidades de fondo plano donde combina formas rectas y curvas, cada cavidad con una profundidad de 16 mm

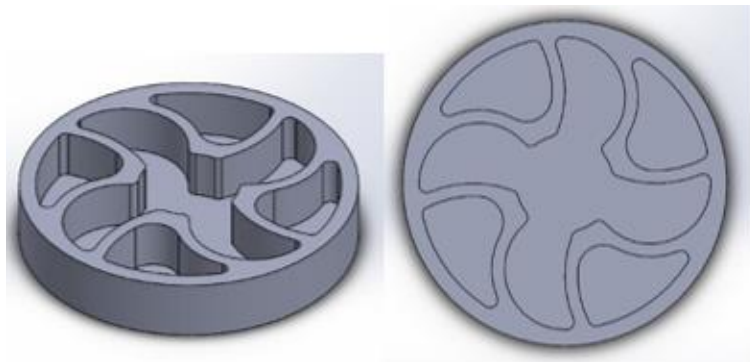
Figura 3.2 Probeta de 4 pulgadas de diámetro exterior



3.2.2. Modelo tridimensional de probeta de 5 pulgadas de diámetro exterior

La siguiente figura es un modelo tridimensional de lo que es la probeta de 5 pulgadas de diámetro exterior, es un bloque de aluminio 6061 con 5 cavidades de fondo plano donde solo hay formas curvas, cada cavidad con una profundidad de 16 mm

Figura 3.3 Probeta de 5 pulgadas de diámetro exterior



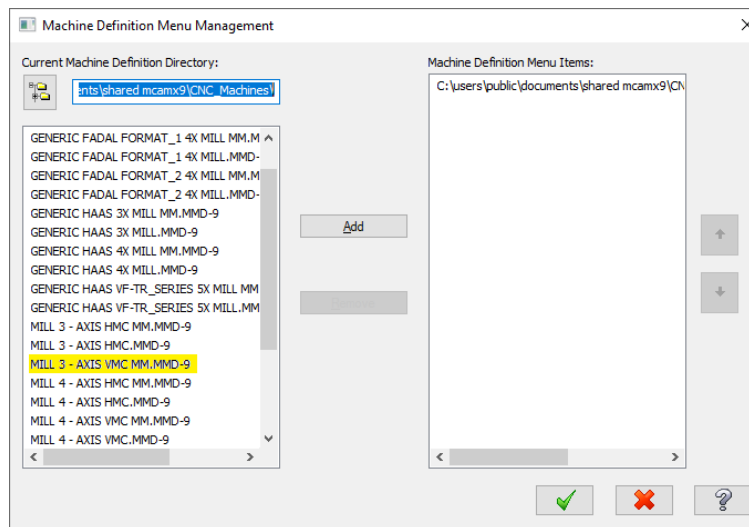
3.3. Exportación de modelo 3D CAD a software CAM

Las probetas realizadas en el software CAD se importan hacia el software CAM con el propósito de realizar la programación de las trayectorias de corte necesarias para mecanizar las probetas, este proceso se describe paso a paso a continuación:

3.3.1. Selección de postprocesador

Para la elaboración de las probetas se selecciona un tipo de postprocesador genérico 3 – AXIS VMC para la generación automática del programa de control numérico, el postprocesador es el traductor que convierte el lenguaje del sistema CAM a lenguaje de máquina, encargado de recopilar información concreta como la geometría de la herramienta, parámetros de corte, estrategias de mecanizado entre otros, para así postprocesar y tener un código para CNC.

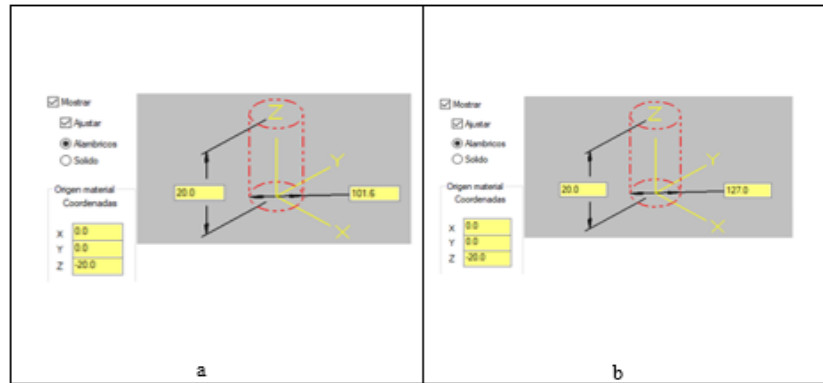
Figura 3.4 Selección de postprocesador



3.3.2. Material inicial

Es el material necesario para la fabricación de una pieza, en este caso son los bloques de aluminio 6061 de 4 pulgadas y 5 pulgadas de diámetro los cuales se utilizarán para realizar el mecanizado de las cavidades de fondo plano por medio de la remoción de material que se va eliminando con la herramienta de corte elegida. En el desarrollo del proyecto se programa con el software CAM cilindros con el diámetro y la altura precisa según lo que se tiene después de estandarizar los bloques de aluminio

Figura 3.5 Configuración de material inicial. a) Material inicial probeta 4 in b) Material inicial probeta 5 in



3.3.3. Estrategia de corte

La estrategia de corte hace referencia a la técnica de maquinado por arranque de viruta que se usara en proceso de manufactura, para el desarrollo se utiliza la forma convencional conocida como Pocket o Cavity la cual se muestra en la figura 3.6 y la forma trocoidal para el desarrollo de la estrategia HSM como se observa en la figura 3.7

Figura 3.6 Estrategia de corte convencional (Pocket o Cavity)

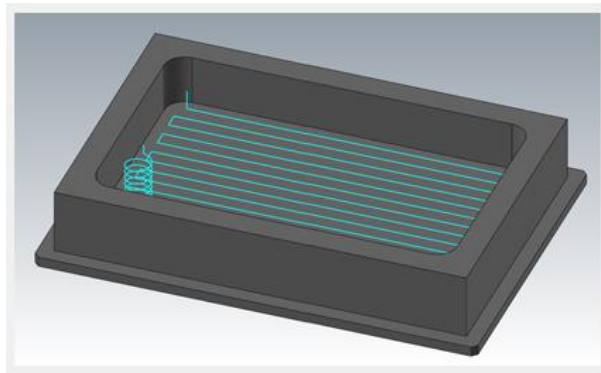
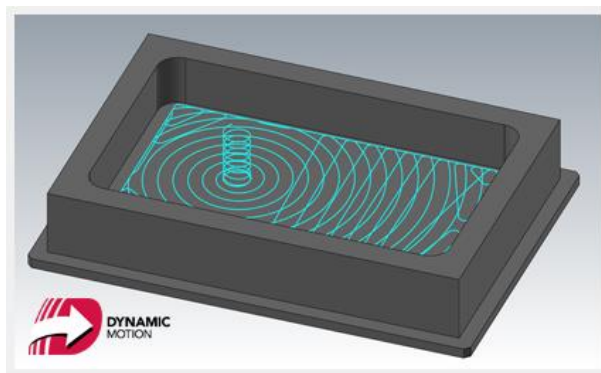


Figura 3.7 Estrategia de corte HSM (Dynamic Mill o Trocoidal)



3.3.4. Herramienta de corte

Es el elemento con el que se lleva a cabo el corte o extracción de material de la pieza sobre la cual se está trabajando, es necesario tener en cuenta las variables las cuales hacen depender la maquinabilidad, por ello se configura de acuerdo con los parámetros conocidos y se estable todas las características en el software CAM

Figura 3.8 Definición de parámetros de herramienta de corte

Define End Mill

Adjust geometric properties used to define the tool shape.

| Overall dimensions | |
|--------------------|----|
| Cutting diameter: | 6 |
| Overall length: | 50 |
| Cutting length: | 25 |

| Tip / corner treatment | |
|----------------------------------|-----------------------|
| <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

| Non-cutting geometry | |
|----------------------|----|
| Shoulder length: | 25 |
| Shoulder diameter: | 6 |
| Shank diameter: | 6 |

3.3.5. Parámetros de corte

Dentro de los parámetros se describe el tipo de operación con la estrategia de corte que se va a realizar, el diámetro de la herramienta, el avance, el avance por minuto, la velocidad del husillo, la velocidad de corte, los parámetros de mecanizado y de entrada de la herramienta, el tipo de entrada, los niveles de mecanizado, el número de pasadas, entre otras opciones definidas en la programación de las trayectorias de corte

- Estrategia de corte convencional

Figura 3.9 Parámetros de corte estrategia convencional

- Estrategia de corte HSM

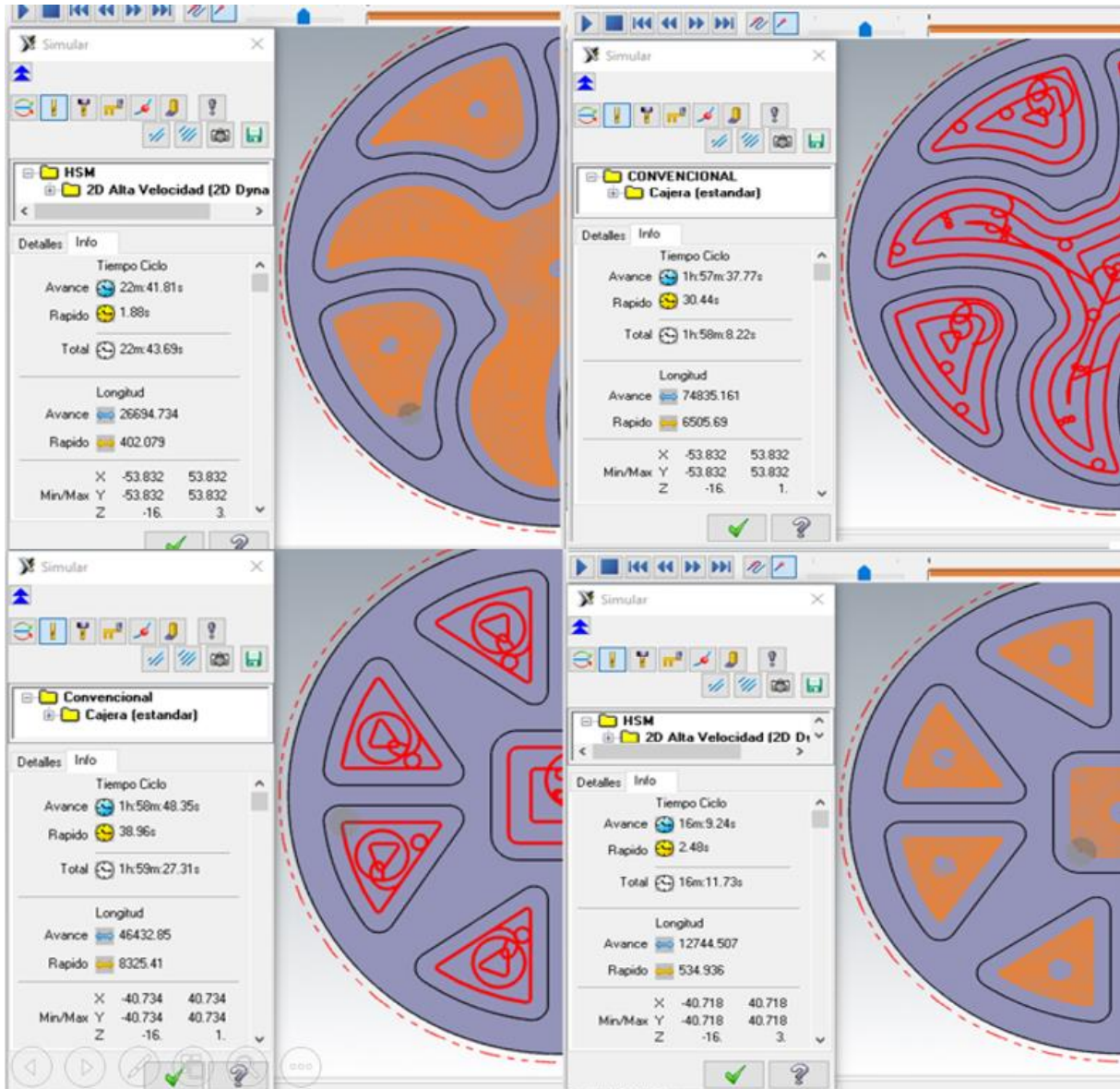
Figura 3.10 Parámetros de corte estrategia HSM

3.3.6. Calculo y simulación de trayectorias de corte

Este apartado muestra la simulación de las trayectorias de ambas estrategias, además se observa información básica del tiempo de ciclo que tardaría la ejecución del programa, esta

información será de utilidad para comparar los tiempos de simulación y los tiempos reales de mecanizado. De igual forma se muestra en la figura la comparación de las trayectorias en la estrategia HSM y en la estrategia convencional

Figura 3.11 Calculo y simulación de trayectorias de corte estrategias convencional y HSM



CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RECOPIACIÓN DE DATOS ADQUIRIDOS

4.1. Objetivo

El capítulo elaborado a continuación contiene la información sobre las pruebas de mecanizado de cavidades de fondo plano mediante las dos estrategias escogidas y la recopilación de los datos adquiridos para el análisis de resultados y posteriores conclusiones

Se evaluará tiempo real de mecanizado, calidad de acabado de la pieza, carga del husillo y estado de la herramienta

Tabla 10. Parámetros de corte utilizados para estrategia convencional y estrategia HSM

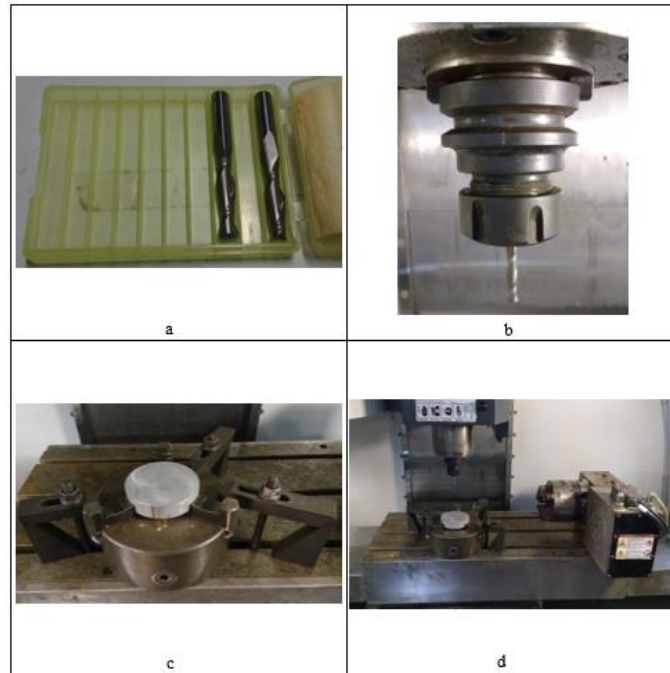
| Pruebas | | |
|---------------------------------------|-------------------------|----------------|
| Parametros | Estrategia convencional | Estrategia HSM |
| Velocidad de corte (V_c) | 71,6 m/min | 140 m/min |
| Velocidad del husillo (n) | 3800 RPM | 7427 RPM |
| Avance (f_z) | 0.0724 mm/rev | 0.0808 mm/rev |
| Avance por minuto (V_f) | 550 mm/min | 1200 mm/min |
| Profundidad de corte axial (a_p) | 0,5 mm | 16 mm |
| Profundidad de corte radial (a_e) | 70% (2,4 mm) | 8% (0,48 mm) |
| Avance vertical | 250 mm/min | 300 mm/min |
| Tipo de entrada | Helicoidal | Helicoidal |

4.2. Montaje

Para garantizar que la maquinabilidad del material sea óptima se debe tener en cuenta los factores que influyen en esta, de este modo se obtendrán los mejores resultados. Es por esto que al inicio de las pruebas se define el tipo de montaje que se utiliza, se selecciona una boquilla de 6 mm para el porta herramientas, de tal forma que la herramienta quede bien posicionada, se emplea una fijación de tres puntos con bridas para las mordazas que sostienen la pieza a mecanizar y así garantizar la mayor rigidez estática y dinámica posible y por último

se configura el sistema de fluido de corte para garantizar una correcta refrigeración en el momento de realizar el mecanizado

Figura 4.1 Montaje. a) Herramientas de corte a utilizar, b) Porta herramientas con fresa de 6 mm de diámetro de corte, c) Mordaza para sujetar herramienta, d) Centro de mecanizado



4.3. Preparación de probetas

Para evitar que una mayor cantidad de variables se presenten en las pruebas, se realiza un proceso para estandarizar el material, con el objetivo de que los resultados sean lo más cercano posible a la realidad y así poder concluir a cerca de ellos. Se toman piezas cilíndricas de la misma barra de aluminio 6061 de 4 pulgadas y 5 pulgadas con un espesor aproximado de 28 mm, seguidamente se programa un planeado en el software CAM, se realiza el montaje adecuado y se ejecuta el programa con el fin de tener una superficie plana, posteriormente se gira la pieza y se ejecuta de nuevo el programa de planeado, esta vez con el objetivo de garantizar de que quede con un espesor de 25 mm. Esto se realiza para cada uno de los 8 pedazos de aluminio cortados con el fin de tener igualdad en las probetas usadas

Figura 4.2 Preparación de probetas. a) Pieza cilíndrica inicial, b) Fresa para planear, d) Panel de CNC ejecutando código para planear, d) Pieza final estandarizada



4.4. Estrategia convencional

A continuación, se evidencia los resultados con la estrategia convencional

Figura 4.3 Probeta 1, 4 pulgadas de diámetro con estrategia convencional. a) Husillo, b) Tiempo, c) Resultado, d) Pieza final

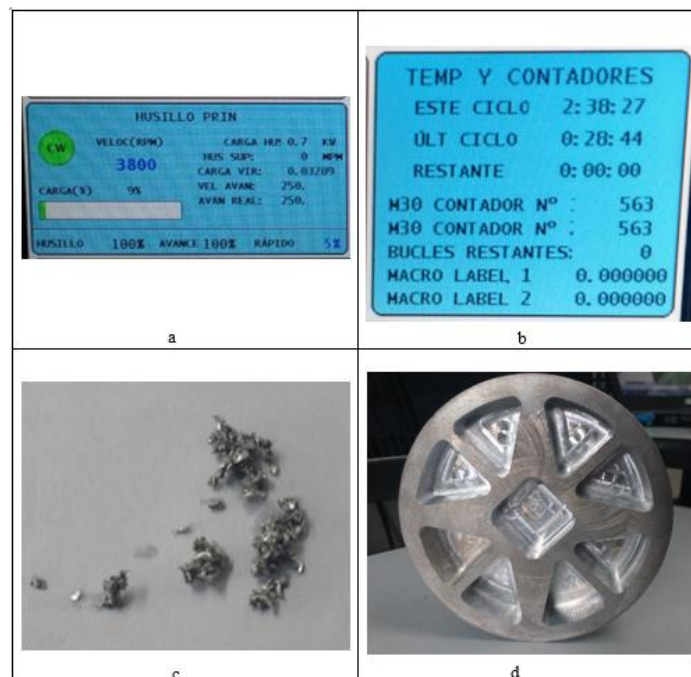


Figura 4.4 Probeta 2, 4 pulgadas de diámetro con estrategia convencional. a) Husillo, b) Tiempo, c) Resultado, d) Pieza final



Figura 4.5 Probeta 3, 5 pulgadas de diámetro con estrategia convencional. a) Husillo, b) Tiempo, c) Resultado, d) Pieza final

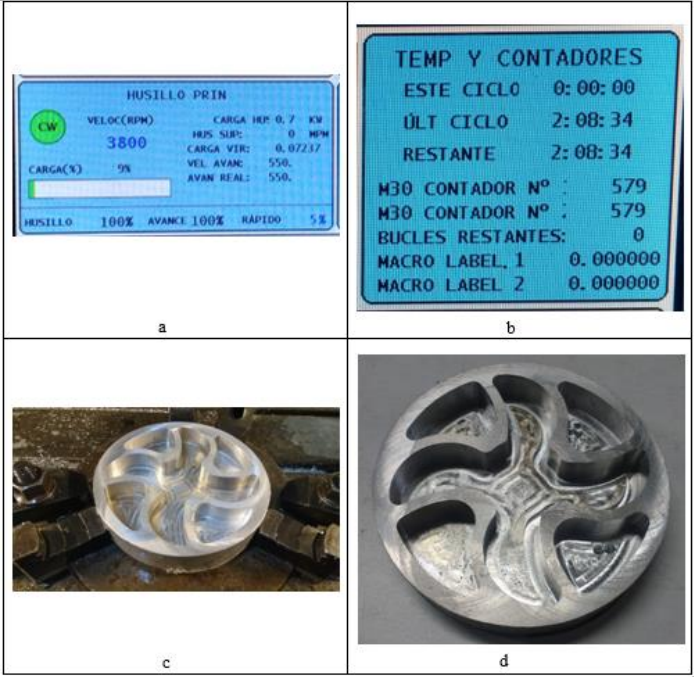


Figura 4.6 Probeta 4, 5 pulgadas de diámetro con estrategia convencional. a) Husillo, b) Tiempo, c) Resultado, d) Pieza final



4.5. Estrategia HSM

A continuación, se evidencia los resultados con la estrategia HSM

Figura 4.7 Probeta 5, 4 pulgadas de diámetro con estrategia HSM. a) Husillo, b) Tiempo, c) Resultado, d) Pieza final



Figura 4.8 Probeta 6, 4 pulgadas de diámetro con estrategia HSM. a) Husillo, b) Tiempo, c) Resultado, d) Pieza final



Figura 4.9 Probeta 7, 5 pulgadas de diámetro con estrategia HSM. a) Husillo, b) Tiempo, c) Resultado, d) Pieza final

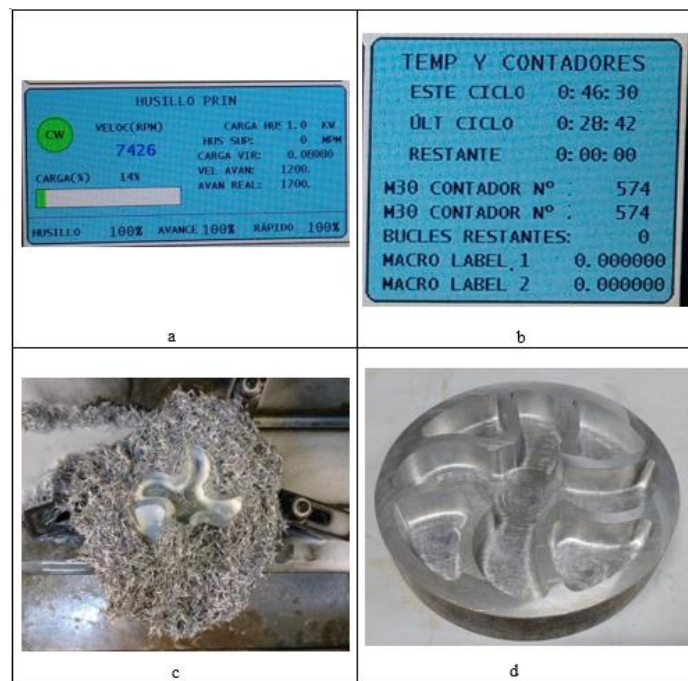
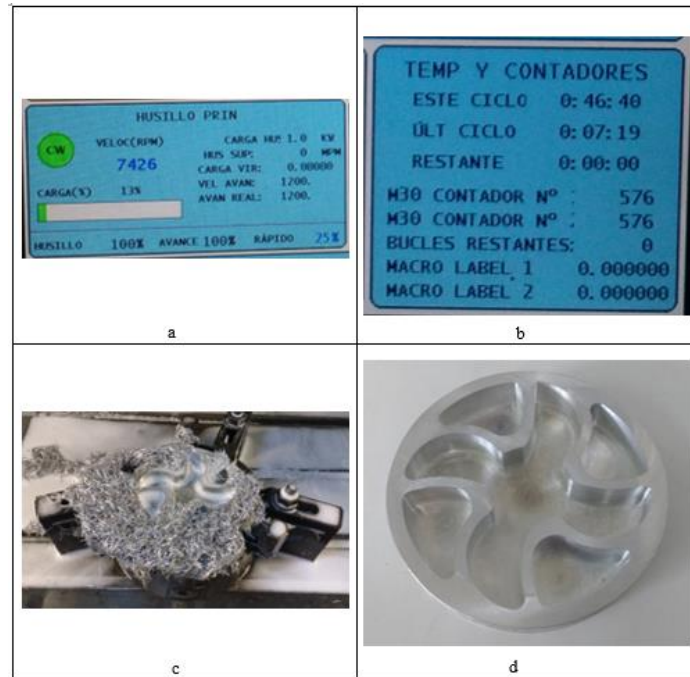


Figura 4.10 Probeta 8, 5 pulgadas de diámetro con estrategia HSM. a) Husillo, b) Tiempo, c) Resultado, d) Pieza final



4.6. Recopilación de datos y comparación de estrategias

Partiendo de los datos adquiridos en el momento de la realización de las pruebas los cuales se evidencia en ítem anterior, se hace una compilación de los resultados y se comparan las dos estrategias utilizadas. En este espacio se exhiben las diferencias en las estrategias de corte

Tabla 11. Comparación de resultados adquiridos

| Comparación de resultados adquiridos | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------|---------|----------------------------|-----------|---------------------------|
| | Carga de husillo [kW] | Carga % | Velocidad de husillo [RPM] | Carga vir | Tiempo de ciclo [h:min:s] |
| Probeta 1 - 4 in Convencional | 0.7 | 9 | 3800 | 0.03289 | 2:38:27 |
| Probeta 2 - 4 in Convencional | 0.5 | 7 | 3800 | 0.03289 | 2:38:17 |
| Probeta 3 - 5 in Convencional | 0.7 | 9 | 3800 | 0.07237 | 2:08:34 |
| Probeta 4 - 5 in Convencional | 0.6 | 8 | 3801 | 0.03289 | 2:08:40 |
| Probeta 5 - 4 in HSM | 1 | 13 | 7426 | 0.0202 | 0:34:11 |
| Probeta 6 - 4 in HSM | 1 | 14 | 7426 | 0.0202 | 0:34:00 |
| Probeta 7 - 5 in HSM | 1 | 14 | 7426 | 0 | 0:46:30 |
| Probeta 8 - 5 in HSM | 1 | 13 | 7426 | 0 | 0:46:40 |

4.7. Acabado superficial

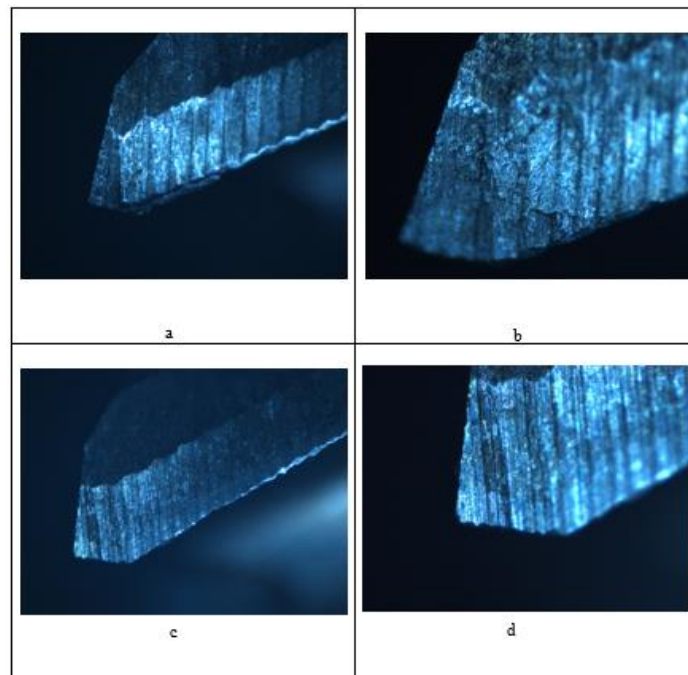
En los procesos de mecanizado obtener una superficie con características adecuada es uno de los objetivos fundamentales debido a múltiples factores comenzando con la estética, además de la liberación de esfuerzos, eliminación de puntos de iniciación de fracturas, propiedades mecánicas de la superficie, rugosidad y tolerancias. En este apartado se evidencia el acabado superficial de las probetas sin entrar en detalle en aspectos cuantitativos o cualitativos.

Figura 4.11 Comparación de acabado superficial entre estrategias de mecanizado convencional y estrategia HSM



4.8. Estado de la herramienta

Figura 4.12 Estado de la herramienta. a) Estrategia convencional 50x, b) Estrategia convencional 100x, c) Estrategia HSM 50x, D) Estrategia HSM 100x



La relación de vida de la herramienta y estado final depende de múltiples factores como, por ejemplo, las variables dependientes del proceso, las variables dependientes de la máquina, las variables dependientes de la pieza y las variables dependientes de la herramienta. En la figura 4.10 se observa el estado final de las herramientas utilizadas en el mecanizado convencional y en el mecanizado de alta velocidad. Se evidencia rastros de aluminio incrustado en la herramienta que fue utilizada en la estrategia convencional, lo que demuestra que se presentaron mayores esfuerzos de corte que en la estrategia HSM

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Objetivo

El análisis de resultados busca dar respuesta a los objetivos planteados al inicio del proyecto y mostrar los datos hallados a partir de los resultados, se detalla cada uno de los datos encontrados y se interpretara mediante la comparación de los métodos convencionales a las nuevas estrategias.

5.2. Tiempo real de mecanizado

Dentro del tiempo real de mecanizado se debe considerar que se requieren una cantidad diferente de tareas y operaciones entre las cuales están la preparación de la máquina, de la herramienta de corte y el mecanizado como tal, teniendo en cuenta también que en el mecanizado propio de la pieza existen lapsos de tiempo en los cuales hay remoción de material y otros lapsos de tiempo en los cuales no hay remoción de material los cuales están compuestos por maniobras como la colocación y retiro de la herramienta, cambios de marcha, cambio de posición de la pieza, entre otros. Estos tiempos no se pueden medir con precisión, por lo cual se hace una estimación desde el inicio de la ejecución del código numérico hasta el final del mecanizado.

Figura 5.1 Resultados tiempo real de mecanizado en aluminio 6061 probetas de 4 in diámetro exterior

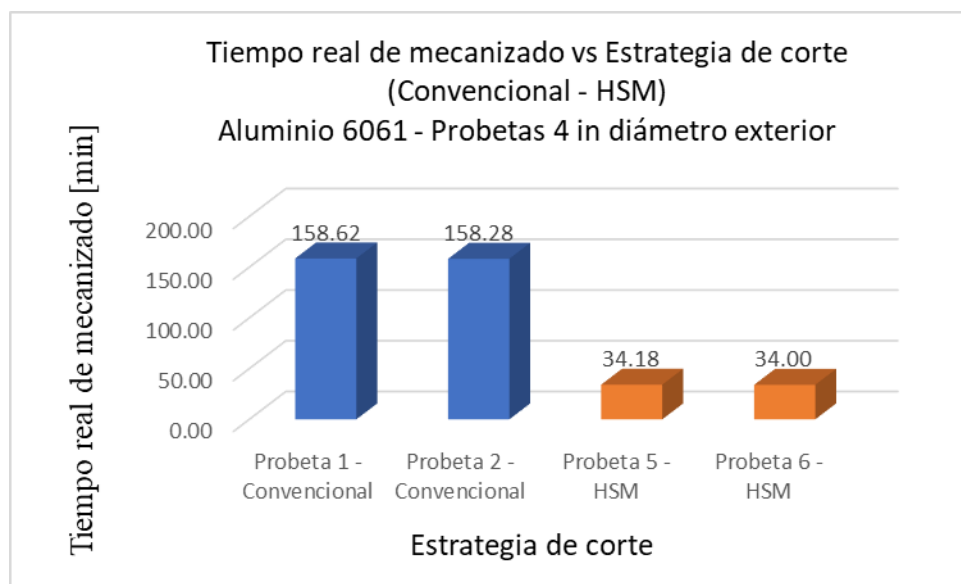
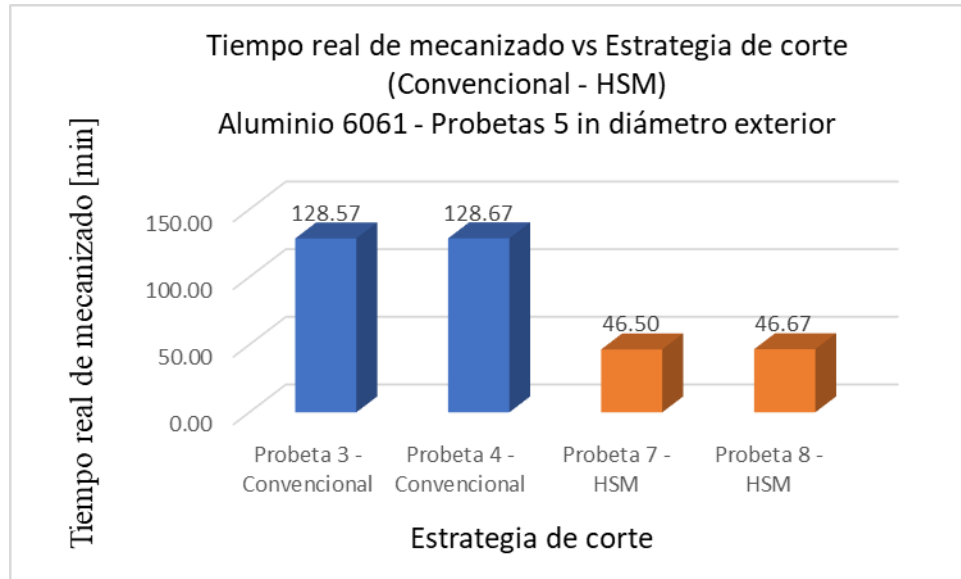


Figura 5.2 Resultados tiempo real de mecanizado en aluminio 6061 probetas de 5 in diámetro exterior



El proceso de producción de piezas o cavidades de fondo plano óptimamente debe estar compuesto por una calidad elevada y un tiempo corto de mecanizado. Se muestra la diferencia de tiempo real de mecanizado entre la estrategia de corte convencional y la estrategia de corte HSM y se halla la reducción promedio de tiempo porcentual

- Aluminio 606 - Probetas 4 in de diámetro exterior

$$TPC = \frac{TRM \text{ probeta } 1 + TRM \text{ probeta } 2}{2}$$

$$TPC = \frac{158.62 \text{ min} + 158.28 \text{ min}}{2}$$

$$TPC = 158.45 \text{ min}$$

$$TPHSM = \frac{TRM \text{ probeta } 5 + TRM \text{ probeta } 6}{2}$$

$$TPHSM = \frac{34.18 \text{ min} + 34 \text{ min}}{2}$$

$$TPHSM = 34.09 \text{ min}$$

$$RTRM = \frac{TPHSM - TPC}{TPC} * 100$$

$$RTRM = \frac{34.09 \text{ min} - 158.45 \text{ min}}{158.45 \text{ min}} * 100$$

$$RTRM = 78.5 \%$$

Donde

TRM: Tiempo real de mecanizado

TPC: Tiempo promedio estrategia convencional

TPHSM: Tiempo promedio estrategia HSM

RTRM: Reducción tiempo real de mecanizado

- Aluminio 606 - Probetas 5 in de diámetro exterior

$$TPC = \frac{TRM \text{ probeta 3} + TRM \text{ probeta 4}}{2}$$

$$TPC = \frac{128.57 \text{ min} + 128.67 \text{ min}}{2}$$

$$TPC = 128.62 \text{ min}$$

$$TPHSM = \frac{TRM \text{ probeta 7} + TRM \text{ probeta 8}}{2}$$

$$TPHSM = \frac{46.50 \text{ min} + 46.67 \text{ min}}{2}$$

$$TPHSM = 46.585 \text{ min}$$

$$RTRM = \frac{TPHSM - TPC}{TPC} * 100$$

$$RTRM = \frac{46.585 \text{ min} - 128.62 \text{ min}}{128.62 \text{ min}} * 100$$

$$RTRM = 63.8 \%$$

Donde

TRM: Tiempo real de mecanizado

TPC: Tiempo promedio estrategia convencional

TPHSM: Tiempo promedio estrategia HSM

RTRM: Reducción tiempo real de mecanizado

Se muestra que con la estrategia HSM se logra reducir el tiempo de mecanizado en 78.5 % en las probetas de 4 in de diámetro exterior y de 63.8 % en las probetas de 5 in de diámetro exterior con respecto a la estrategia de corte convencional, mostrando de igual forma que los parámetros escogidos para realizar las trayectorias trocoidales fueron efectivas generando por ende una mayor productividad y una disminución de costos en los procesos de manufactura

5.3. Régimen de arranque de viruta

El volumen de metal eliminado o el régimen de arranque de viruta es un parámetro que depende del avance, el ancho y profundidad de corte. Este parámetro muestra otra ventaja de la estrategia HSM con respecto a los métodos de corte convencional, a pesar de que se reduce la profundidad de corte radial, el aumento en el avance y la profundidad de corte axial genere un incremento en la tasa de remoción de material, siendo así razón para disminuir los tiempos de mecanizado y los costos de producción.

$$Q = \frac{a_p * a_e * V_f}{1000}$$

Tabla 12. Parámetros de corte

| Estrategia convencional | | |
|-----------------------------|-------------|------|
| Velocidad del husillo | n [rpm] | 3800 |
| Avance por minuto | Vf [mm/min] | 550 |
| Profundidad de corte axial | ap [mm] | 0.5 |
| Profundidad de corte radial | ae [mm] | 4.2 |
| Profundidad de corte radial | ae [%] | 70% |
| Estrategia HSM | | |
| Velocidad del husillo | n [rpm] | 7427 |
| Avance por minuto | Vf [mm/min] | 1200 |
| Profundidad de corte axial | ap [mm] | 16 |
| Profundidad de corte radial | ae [mm] | 0.48 |
| Profundidad de corte radial | ae [%] | 8% |

Utilizando los parámetros de corte de la estrategia de corte convencional y HSM calculamos el régimen de arranque de viruta para cada una de ellas

- Estrategia convencional

$$Q = \frac{a_p * a_e * V_f}{1000}$$
$$Q = \frac{0.5 \text{ mm} * 4.2 \text{ mm} * 550 \text{ mm/min}}{1000}$$
$$Q = 1.155 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}}$$

Donde

V_f : Avance por minuto

a_p : Profundidad de corte axial

a_e : Profundidad de corte radial

- Estrategia HSM

$$Q = \frac{a_p * a_e * V_f}{1000}$$
$$Q = \frac{16 \text{ mm} * 0.48 \text{ mm} * 1200 \text{ mm/min}}{1000}$$
$$Q = 9.216 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}}$$

Donde

V_f : Avance por minuto

a_p : Profundidad de corte axial

a_e : Profundidad de corte radial

Se ve evidente que con la estrategia HSM se logra un régimen de arranque de viruta o una tasa de remoción de material $9.216 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}}$ mientras que con la estrategia convencional se llega a un régimen de arranque de viruta de $1.155 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}}$ mostrando así otra ventaja del mecanizado de alta velocidad, llegando a una mayor productividad y una disminución de costos en los procesos de manufactura

$$Q = \frac{QHSM - QC}{QC} * 100$$

$$Q = \frac{9.216 \frac{mm^3}{min} - 1.155 \frac{mm^3}{min}}{1.155 \frac{mm^3}{min}} * 100$$

$$Q = 697.9 \%$$

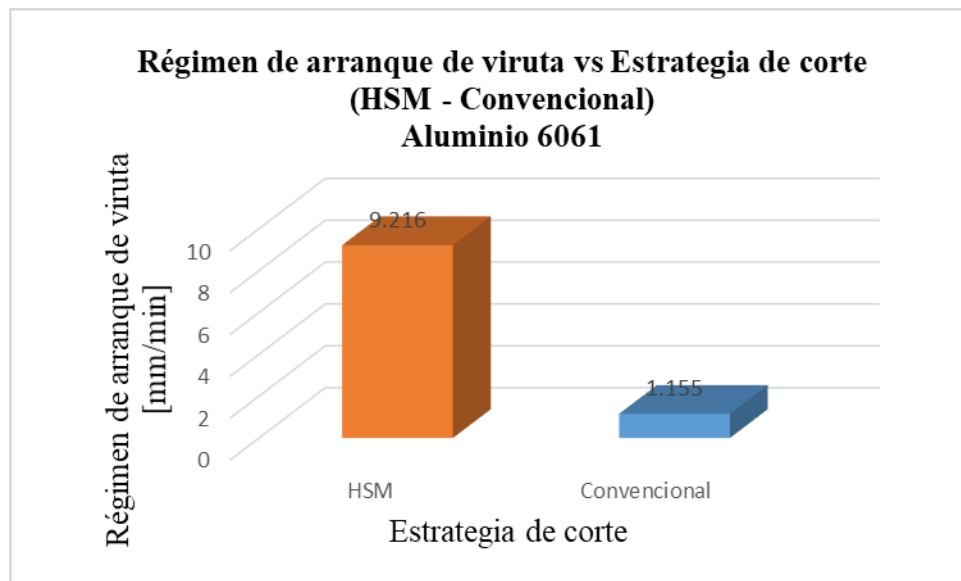
Donde

AQ: Aumento en el régimen de arranque de viruta

QHSM: Régimen de arranque de viruta estrategia HSM

QC: Régimen de arranque de viruta estrategia convencional

Figura 5.3 Resultados régimen de arranque de viruta en aluminio 6061



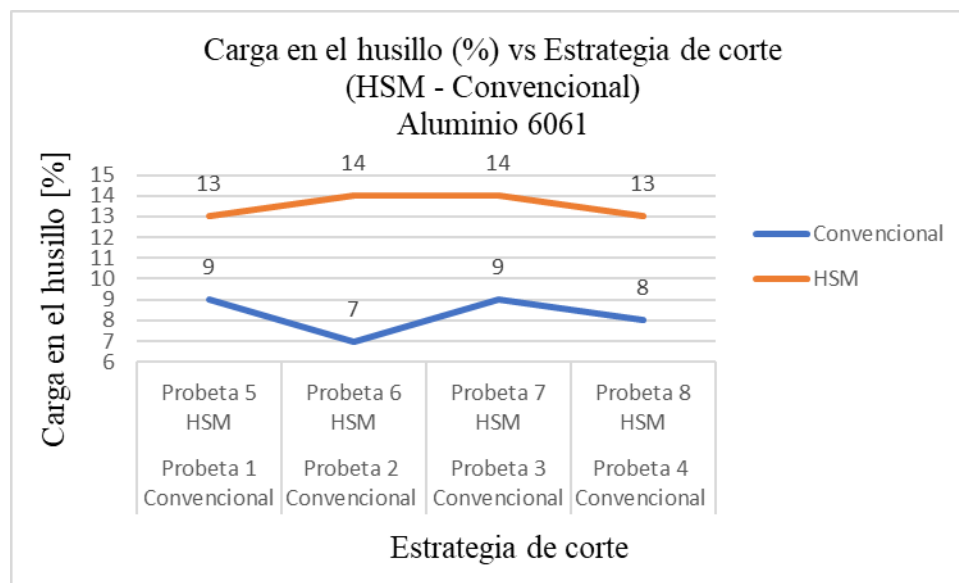
Se muestra que con la estrategia HSM se logra aumentar en 697.9 % el régimen de arranque de viruta, dato con el cual se evidencia la alta eficiencia en la estrategia de corte de alta velocidad en comparación con los parámetros convencionales.

5.4. Carga en el husillo

La carga en el husillo es un parámetro que depende de la carga axial y la velocidad de rotación (RPM) lo cual representa el momento crítico sobre la máquina. Se evidencia que, con los parámetros de corte convencional, donde la profundidad de corte axial es menor las cargas en el husillo son menores, esto también se puede generar por las diferencias de las velocidades de avance. De igual forma se confirma que en la estrategia HSM los recursos de la maquina deben ser más exigentes para un correcto mecanizado.

En la siguiente grafica se evidencia con una línea naranja las cargas en el husillo de la estrategia de corte HSM y con una línea azul las cargas en el husillo generadas por la estrategia de corte convencional, se refleja la diferencia y el aumento de ellas por el mecanizado de alta velocidad.

Figura 5.4 Resultados carga en el husillo en aluminio 6061



5.5. Análisis general

La estrategia de corte HSM es por mucho una forma de mecanizado más eficiente con respecto a la forma convencional que se utiliza para los procesos de remoción de material, comparando los parámetros escogidos para ambas estrategias se halla que se aumenta la precisión y la calidad superficial de las piezas utilizando un mecanizado de alta velocidad. Esto se debe a las múltiples mejoras, como por ejemplo la reducción en la generación de calor durante el corte de material debido a la reducción en el tiempo de contacto entre la herramienta y la pieza y un mayor enfriamiento en el aire de la herramienta de corte, lo que se resume en una reducción de fuerzas en el momento de mecanizado.

Se puede afirmar que se aumenta la vida de la herramienta con la relación a la producción, debido a que en el momento de mecanizado se utiliza toda la longitud del filo lo que supone un calentamiento y desgaste uniformes y distribuidos. Asimismo, utilizando la estrategia trocoidal se logra aumentar la velocidad de avance y evitar las esquinas súbitas lo que representa una reducción en los esfuerzos de corte y consecuentemente un aumento de la vida de la herramienta, al mismo tiempo por la reducción de la longitud de corte radial reducir el espesor de viruta. Finalmente cabe resaltar que las pruebas se realizaron en una máquina no diseñada específicamente para el mecanizado de alta velocidad, sin embargo, se hallaron resultados muy significativos lo que representa que el uso de estrategias HSM son posibles en máquinas no pensadas para ello.

CONCLUSIONES

Se hizo una búsqueda bibliográfica de los conceptos teóricos relacionados con el mecanizado convencional y sus parámetros de corte, además de la estrategia trocoidal relaciona con el High Speed Machining. Igualmente se identificaron trabajos, artículos y documentos de temáticas similares desarrolladas a nivel mundial.

Teniendo en cuenta los conceptos teóricos sobre High Speed Machining y revisando las características del centro de mecanizado Haas VF-2, se llegó a la conclusión de que una buena opción para mecanizar aluminio 6061 son las trayectorias trocoidales y los parámetros de corte escogidos. Además, se calculó el régimen de arranque de viruta como uno de los parámetros más importantes, que demuestran la ventaja para la aplicación de la técnica HSM.

Se diseñaron y mecanizaron probetas de cavidades de fondo plano que permitieran realizar el análisis y comparación de datos adquiridos para mostrar que la aplicación de HSM es una herramienta adecuada para las tareas de remoción de material en comparación con las técnicas convencionales, pues redujo el tiempo de mecanizado, mejoró la calidad de la superficie y se obtuvo un aumento en el régimen de arranque de viruta.

Se demostró que el uso de las estrategias High Speed Machining son viables en máquinas con husillos no pensadas para las altas velocidades, esto se muestra con los resultados hallados en las pruebas y mostrando las características del centro de mecanizado Haas VF-2 el cual tiene un husillo con velocidad máxima de 8100 rpm.

RECOMENDACIONES

Se propone extender los estudios expuestos en este proyecto acerca del HSM en otro tipo de materiales, con el fin de establecer relaciones entre los parámetros y trayectorias aplicadas con respecto al tiempo y calidad final de la pieza, de igual forma determinar los parámetros óptimos para diferentes tipos de materiales.

Continuar investigando acerca de otras variables de las cuales depende la maquinabilidad de los materiales para establecer parámetros óptimos que conlleven a obtener mejores resultados que se puedan extender a otro tipo de modelos de cavidades de fondo plano.

Se sugiere investigar el uso de herramientas de alto rendimiento o herramientas con un revestimiento de superficie dura con protección térmica en la ejecución del mecanizado de alta velocidad para mostrar los cambios en el estado final de la herramienta y las mejoras posibles.

Buscar alternativas para la eliminación de viruta con el fin de reducir el choque térmico en el cortador producido por el roce con la viruta acumulada en la pieza que se está mecanizando

BIBLIOGRAFÍA

- [1] VANDRESEN, M. Fresamento de cavidades auxiliado por computador, na industria de moldes para plástico. Florianópolis: Dissertação de Mestrado, UFSC, 1997.
- [2] High Speed Machining, Trochoidal Milling, and HSM Speeds and Feeds CNC Milling Feeds and Speeds Cookbook. (2018). Retrieved from <https://www.cnccookbook.com/high-speed-machining-trochoidal-milling-hsm-speeds-and-feeds/>
- [3] Proceso de fresado - Procesos de Manufactura. (2018). Retrieved from <https://sites.google.com/site/procesosdemanufacturaetitc/tipos-de-procesos/proceso-de-fresado>
- [4] Groover, M. (2007). Fundamentos de manufactura moderna (3rd ed.). México: Prentice-Hall Hispanoamericana.
- [5] DeGarmo, E. P., Black, J. T., y Kohser, R. A. *Materials and Processes in Manufacturing*, 9a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2003
- [6] Kalpakjian, S., Schmid, S., & Espinoza Limón, J. (2008). Manufactura, ingeniería y tecnología (4th ed.). México, D.F.: Pearson Educacion.
- [7] Eary, D. F. y Johnson, G. E., *Process Engineering: for Manufacturing*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1962.
- [8] Sandvik Coromant - manufacturing tools & machining solutions. (2018). Retrieved from <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/pages/default.aspx>
- [9] Pasko, R., Przybylski, L., & Slodki, B. HIGH SPEED MACHINING (HSM) – THE EFFECTIVE WAY OF MODERN CUTTING [Ebook]. Retrieved from http://fstroj.utc.sk/journal/engl/papers/034_2002.pdf
- [10] Evans, R., & Platt, E. Aluminum High Speed Machining Metalworking Fluid Performance in Aluminum High Speed Machining [Ebook]. The Pennsylvania State

University. Retrieved from
<https://www.mmsonline.com/cdn/cms/uploadedFiles/vHSM%20July%202009%20Publication%20draft.pdf>

[11] High Speed Machining 310. (2008). Copyright Tooling U, LLC, p.6.

[12] R, N. (2018). High speed machining (HSM). [online] Es.slideshare.net. Available at:
<https://es.slideshare.net/nikhilkashyap125/high-speed-machining-hsm> [Accessed 3 Oct. 2018].

[13] Stemmer, C. (2005). *Ferramentas de corte I*. Florianópolis: Ed. da UFSC.

[14] Haascnc.com. (2019). *Haas Automation - El mejor valor en mecanizado CNC*. [online] Available at:
<https://www.haascnc.com/es.html/>
https://int.haascnc.com/mt_spec1.asp?intLanguageCode=1034&id=VF-2&webID=40_TAPER_STD_VMC [Accessed 5 Dec. 2018].

[15] Smithmetal.com. (2018). *6061 Aluminium Technical Datasheet*. [online] Available at:
<https://www.smithmetal.com/pdf/aluminium/6xxx/6061.pdf> [Accessed 14 Nov. 2018].

[16] User, S. (n.d.). *Aceite y Refrigerante*. [online] Herratec.com.co. Available at:
<http://www.herratec.com.co/catalogo/aceites-y-refrigerantes/item/aceite-y-refrigerante>
[Accessed 16 Sep. 2018].